



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU TAPIO
VÄRIVALOKUVAUKSEEN PERUSTUVA
KAKSIVÄRIPYROMETRIA POLTTOTEKNIIKAN SOVELLUKSISSA
Diplomityö

Tarkastaja: dosentti Juha Toivonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
8. helmikuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

TAPIO, TEEMU: Värivalokuvaukseen perustuva kaksiväripyrometria polttotekniikan sovelluksissa

Diplomityö, 68 sivua, 9 liitesivua

Toukokuu 2015

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastaja: dosentti Juha Toivonen

Avainsanat: lämpötilan mittaaminen, kaksiväripyrometria, värikamerapyrometria, digitaalinen valokuvaus, kuvaan perustuva mittaaminen, polttotekniikka, palaminen, biopolttoaine, pudotusputkireaktori, emissiviteetti

Biopolttoaineiden lisääntynyt käyttö suomalaisessa energiantuotannossa on lisännyt kiinnostusta sen polttoprosesseissa tapahtuvia palamisreaktioita kohtaan. Biopolttoaineiden palamisominaisuuksia voidaan tutkia kokeellisesti. Kokeellisen tutkimuksen avulla päästään käsiksi numeerisissa palamismalleissa esiintyviin parametreihin, joita optimoimalla polttoprosesseja voidaan kehittää puhtaammiksi ja energiatehokkaammiksi. Polttoaineiden ominaisuuksia tutkittaessa niiden palamislämpötilan luotettava mittaus on tärkeää. Tässä diplomityössä tehtiin selvitystä, miten polttoprosesseissa esiintyviä korkeita lämpötiloja voidaan mitata digitaalista värivalokuvausta käyttämällä.

Työssä luotiin teknologiapohja tavallisella digitaalisella värikameralla suoritettavaan korkealämpötilamittaukseen. Tavoitteena työssä suoritetuissa mittauksissa oli menetelmän toimivuuden todentaminen. Mittaustekniikka perustuu optiseen kaksiväripyrometriaan. Pyrometriassa lämpötilaa mitataan kosketuksettomasti mittaushetken emittoiman lämpösäteilyn voimakkuuden perusteella. Kaksiväripyrometriassa säteilyvoimakkuutta mitataan kahdella toisiaan lähellä olevalla kapealla aallonpituuskaistalla. Värikameralla suoritettava korkealämpötilamittaus pohjautuu näkyvän valon ja lähi-infrapunavalon, tai pelkästään näkyvän valon, taltioimiseen kameran valoherkän kuvakennon avulla.

Diplomityössä toteutettiin CCD-suurnopeusvärikameraan perustuva mittalaite, jolla palavan polttoainehiukkasen pintalämpötilaa ja fyysistä kokoa voidaan mitata kaksiväripyrometriaa soveltaen. Mittalaite kehitettiin polttoainehiukkasten tutkimuslaitteistona käytettävään pudotusputkireaktoriin. Työssä suunnitellun mittaustekniikan avulla on mahdollista mitata myös yksittäisen hiukkasen putoamisnopeus reaktorissa yhtäaikaaisesti hiukkasen pintalämpötilan ja koon kanssa. Työssä kehitettiin laskentaohjelmisto palavan polttoainehiukkasen pintalämpötilan laskemiseksi CCD-värikameralla otetusta mittauskuvasta.

Värikameralla suoritettavaa korkeiden lämpötilojen mittaustekniikkaa sovellettiin työssä myös toiseen polttotekniikan tutkimussovellukseen. Sovelluskohteessa mitattiin laboratorioreaktorissa palavan rapsipelletin pintalämpötiloja palamisen eri vaiheissa ja rapsipelletin eri osissa. Mittalaitteena käytettiin kaupallista CMOS-järjestelmäkameraa. Järjestelmäkameralla otetuille mittauskuville suunniteltiin laskentaohjelmisto, jonka avulla voidaan laskea pintalämpötilajakaumia mille tahansa palavalle polttoainepartikkelille. Etuina kaupallisen järjestelmäkameran käyttämiselle korkeiden lämpötilojen mittalaitteena ovat niiden edullisuus, kompaktius, helppokäyttöisyys sekä laaja saatavuus.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Science and Engineering

TAPIO, TEEMU: Two-color pyrometry based on the color photography in combustion technology applications

Master of Science Thesis, 68 pages, 9 Appendix pages

May 2015

Major: Engineering Physics

Examiner: docent Juha Toivonen

Keywords: temperature measurement, two-color pyrometry, camera pyrometry, digital color camera, image based measurement, combustion technology, combustion, biofuel, drop-tube reactor, emissivity

The increase in the use of biofuels in the Finnish energy production has expanded the interest in their combustion properties. The combustion properties can be researched experimentally. With the help of the experimental research it is gotten at the parameters which appear in numerical combustion models. By optimizing the numerical parameters, the combustion processes can be developed cleaner and more energy efficient. When the combustion properties of the fuels are studied, the reliable measuring of their combustion temperature is important. In this thesis it was studied how high temperatures, which appear in different combustion processes, can be measured with the help of color photography.

In the thesis, a technology basis for the high temperature measurement using a widely available digital color camera was developed. In the performed measurements, the objective was to verify the functionality of the method. The demonstrated optical measurement technology is based on a non-contact two-color pyrometry. In pyrometry, the temperature is measured using the thermal radiation emitted by the hot object's surface being measured. The high temperature measurement performed with the color camera is based on the detection of a visible and near infrared light, or merely visible light, with the help of the light-sensitive image sensor of the camera.

A measuring device which is based on a high speed CCD color camera was carried out. The device can be used to measure the surface temperature and a physical size of the burning fuel particle adapting two-color pyrometry. The device was developed for a drop-tube reactor which is used as the study equipment of fuel particles. With the help of the measuring technology that has been designed in the work it is also possible to measure the velocity of the individual particle in the reactor simultaneously with the surface temperature and size of the particle. In the work, a computing code which can be used to calculate the surface temperature of the fuel particle from the taken digital color image was developed.

The high temperature measurement technique using a digital color camera was also adapted to another research application in this work. In the application the surface temperatures of the oilseed rape pellet which burns in the laboratory reactor were measured at different stages of the burning and in the separate parts of the oilseed rape pellet. A commercial digital single-lens reflex camera was used as a measuring device. In the work, a computing code which can be used to calculate the temperature distributions to any burning fuel particle was developed for the used DSLR camera.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Fysiikan laitoksella Optiikan laboratoriossa yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston Energia- ja prosessitekniikan laitoksen kanssa. Työ kuului osaksi Tekesin FUSEC-yritysryhmähanketta (*Future Fuels for Sustainable Energy Conversion*). Tutkimushankkeessa TTY:n Optiikan laboratorion roolina on ollut kehittää uusia optisia mittaustekniikoita biomassan polttoprosessien tutkimiseen. Tässä työssä on mukana yhteistyössä ollut TTY:n Energia- ja prosessitekniikan laitoksen lisäksi Valmet Technologies Oy ja Åbo Akademi. Haluan antaa kiitoksen kaikille yhteistyötahoille.

Suuret kiitokset sekä työni tarkastajalle dosentti Juha Toivoselle että ohjaajalle TkT Tapio Sorvajärvelle asiantuntevasta opastamisesta työn vaiheissa sekä mielenkiintoisen opinnäytetyöaiheen tarjoamisesta. Kiitos kuuluu myös Optiikan laboratorion henkilökunnalle sujuvista työolosuhteista ja mukavasta työilmapiiristä.

Työhön liittyviä mittauksia tehtiin TTY:n Energia- ja prosessitekniikan laitoksen laboratoriossa ja Åbo Akademin Prosessikemian keskuksen laboratoriossa Turussa. Kiitokset mahdollisuuksista käyttää laboratorioden tutkimuslaitteistoja. Haluan kiittää Energia- ja prosessitekniikan laitokselta erityisesti prof. Risto Raikoa, prof. Pentti Saarenrintä, DI Henrik Tolvasta ja käyttöinsinööri Jarmo Ruusilaa hyvästä yhteistyöstä.

Lopuksi lämmin kiitos vanhemmilleni ja siskolleni kaikesta tuesta, kannustuksesta ja loputtomasta uskosta minuun opintieni aikana. Kiitos kuuluu myös kaikille ystäväilleni siitä, että olette niin loistotyyppejä. Erityiskiitos kaikesta tuesta ja ymmärryksestä työstävälleni, Miialle.

Tampereella 20.4.2015

Teemu Tapio
Rantatie 13 C 17
33250 Tampere
teemutp@gmail.com

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	OPTINEN PYROMETRIA	3
2.1	Mustan kappaleen säteily	3
2.2	Mustan kappaleen säteilylain historiaa	4
2.3	Planckin säteilylaki.....	5
2.4	Reaalin säteilijä.....	8
2.5	Pyrometrinen lämpötilan määrittäminen.....	10
2.6	Kaksiväripyrometria	11
3.	DIGITAALINEN VALOKUVAUS	13
3.1	Valoherkkä kenno.....	13
3.2	Värikuvan tuottaminen digitaalikamerassa	14
3.3	Kennon herkkyys.....	16
3.4	Kohina.....	17
3.5	Dynaaminen alue	19
3.6	CCD-kenno	20
3.7	CMOS-kenno	23
4.	VÄRIKAMERAPYROMETRIA	25
4.1	Lämpötilan mittaus värikameralla	26
4.2	Työn mittalaitteina käytetyt kamerat	27
4.2.1	CCD-kamera IMPERX Bobcat.....	28
4.2.2	CMOS-järjestelmäkamera Nikon D5000	31
4.3	Mittausjärjestely	34
4.4	Laskentamenetelmä	37
5.	MITTAUSSOVELLUKSET	46
5.1	Palavien polttoainehiukkasten mittaus pudotusputkireaktorissa	46
5.2	Palavan rapsipelletin pintalämpötilajakauman mittaus	54
5.3	Leijupoltossa käytettävien kiintoaineiden emissiviteetin mittaus	58
6.	YHTEENVETO.....	61
	LÄHDELUETTELO.....	64
	LIITTEET.....	69

MERKINNÄT JA LYHENTEET

α	absorbanssi
B	mustan kappaleen säteilyvoimakkuus, W/m ²
B_λ	mustan kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus, W/m ³
δ_{dark}	pimeävirran kohinan suuruus
D_{QE}	kuvakennon kvanttihyötysuhde
$\delta_{readout}$	lukukohinan suuruus
δ_{signal}	fotoni-raekohinan suuruus
ϵ	emissiivisyys
F_λ	pyrometrin vastefunktio aallonpituudella λ
i_{dark}	pimeävirta, A
t_{int}	integrointiaika, s
λ	aallonpituus, m
M	säteilyvoimakkuus, W/m ²
M_λ	spektrinen säteilyvoimakkuus, W/m ³
ν	taajuus, s ⁻¹
N_e	elektronien lukumäärä
P	fotonien määrä / pikseli / sekunti
Q	varauskapasiteetti, C
T	lämpötila, K
T_b	kirkkauslämpötila, K
T_c	väriämpötila, K
u_λ	spektrinen säteilyenergian tiheys, J/m ⁴
u_ν	spektrinen säteilyenergian tiheys, J/(m ³ s ⁻¹)
φ_λ	mittalaitteen spektrinen herkkyysvaste tietyllä aallonpituuskaistalla
$\varphi_{PUN.}$	kuvakennon punaisen värikanavan spektrinen herkkyysvaste
$\varphi_{SIN.}$	kuvakennon sinisen värikanavan spektrinen herkkyysvaste
$\varphi_{VIHR.}$	kuvakennon vihreän värikanavan spektrinen herkkyysvaste
A/D-muunnin	analogi-digitaali-muunnin
CCD	varauskytketty piiri (Charge Coupled Device)
CFA	värimosaiikkimatriisi (Color Filter Array)

CFB	kiertoleijupetikattila (Circulating Fluidized Bed)
CFD	laskennallinen virtausdynamiikka (Computational Fluid Dynamics)
CMOS	komplementaarinen metallioksidipuolijohde (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
DN	pikseliarvo (Digital Number)
DNG	valmistajariippumaton raakakuvatiedostomuoto (Digital Negative)
DSLR	digitaalinen yksisilmäinen peiliheijastuskamera (Digital Single-Lens Reflex camera)
ISO	kansainvälinen standardisoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
ITCCD	Interline-Transfer Charge Coupled Device
LED	hohtodiodi (Light-Emitting Diode)
MOS	metallioksidipuolijohde (Metal Oxide Semiconductor)
ND	harmaasuodin (Neutral Density filter)
NEF	Nikon-kameroiden häviötön raakakuvatiedostomuoto (Nikon Electronic Format)
NIR	lähi-infrapunavalo (Near InfraRed)
OD	vaimennusvoimakkuus (Optical Density)
QE	kvanttihyötysuhde (Quantum Efficiency)
RAW	häviötön raakakuvatiedostomuoto
SNR	signaali-kohinasuhde (Signal to Noise Ratio)
TIFF	häviötön kuvatiedostomuoto (Tagged Image File Format)
UV	ultraviolettivalo (Ultra Violet)
VIS	näkyvä valo (VISible)

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen kiihtyminen ja fossiilisten polttoaineiden ehtyminen ovat lisänneet huomattavasti uusiutuvien energialähteiden kysyntää viimeisten vuosikymmenien aikana. Uusiutuvan energian sanotaankin olevan avaintekijä tulevaisuuden energiaratkaisuissa maapallollamme. Yksi tärkeimmistä uusiutuvista energialähteistä ovat biopolttoaineet. Eloperäisen biomassan poltolla on oleellinen rooli Suomen tavoitteessa lisätä uusiutuvien lähteiden osuutta energiantuotannossa. Poltettavaa biomassaa saadaan metsäteollisuuden puuperäisistä sivuvirroista, maatalouden energiakasveista sekä kasvi- ja yhdyskuntajätteistä.

Biomassan polttoprosessissa tapahtuvaa palamista voidaan mallintaa matemaattisesti. Numeeristen palamismallien avulla ymmärretään paremmin palamisessa tapahtuvia kemiallisia reaktioita. Palamismalleissa esiintyviä parametreja optimoimalla voidaan parantaa polttoaineen palamisolosuhteita ja näin ollen kehittää polttoprosessia puhtaammaksi ja energiatehokkaammaksi. Yksi tärkeimmistä palamismallien parametreista on polttoaineen palamislämpötila. Siksi sen luotettava ja tarkka mittaaminen on välttämätöntä. Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia uudenlaisen optisen mittaustekniikan soveltuvuutta polttoprosesseissa esiintyvien korkeiden lämpötilojen mittaamiseen. Työssä keskityttiin luomaan teknologiapohja korkealämpötilamittauksiin käyttämällä värivalokuvausta. Värivalokuvaukseen pohjautuvalla mittaustekniikalla voidaan seurata palamisreaktion etenemistä tutkittavan polttoainepartikkelin eri kohdissa. Mittalaitteena toimivan digitaalisen värikameran avulla voidaan määrittää myös polttoaineiden emissiviteettiä sekä yksittäisten polttoainepartikkelien fyysistä kokoa palamisen eri vaiheissa. Käytetyn mittaustekniikan soveltuvuutta polttoprosessien kokeelliseen tutkimiseen tarkasteltiin laboratorioreaktoreissa suoritetuilla mittauksilla.

Työn tutkimuksen kohteena oleva mittaustekniikka on nimeltään värikamerapyrometria. Pyrometriassa lämpötila mitataan kosketuksettomasti mittaushohteen emittoiman lämpösäteilyn voimakkuuden perusteella jonkin optisen mittalaitteen, esimerkiksi kameran, avulla. Värikamerapyrometria perustuu kaksiväripyrometrian teoriaan. Kaksiväripyrometriassa säteilyvoimakkuutta mitataan kahdella toisiaan lähellä olevalla kapealla aallonpituuskaistalla. Mittalaitteena käytettävä digitaalinen värikamera tallentaa valoherkän kuvakennonsa avulla mittaushohteen emittoiman lämpösäteilyn voimakkuutta kuvaavat pikseliarvot digitaaliseen valokuvaan. Kuvakenno jakaa lämpösäteilyn kolmelle eri valon värikanavalle. Värikanavien pikseliarvoista voidaan määrittää palavan mittaushohteen pintalämpötila halutussa osassa kohdetta, kun tunnetaan kennon värikanavien herkkyys eri aallonpituuksilla. Lämpötilan määrittämiseen käytetään kennon kahta väri-

kanavaa. Mittaustekniikan avulla voidaan määrittää myös kuumien mittaushkohteiden lämpötilajakaumia halutulla ajanhetkellä.

Diplomityön aluksi käydään läpi työn kannalta tärkeimmät teoreettiset lähtökohdat. Luvussa kaksi esitellään optisen pyrometrian fysikaalisia perusteita ja Planckin säteilylain teoriaa. Luvussa kolme paneudutaan digitaalisen valokuvauksen teoriaan ja värikuvan tuottamiseen digitaalikameroissa. Lisäksi luvussa kolme selvitetään ja vertaillaan digitaalikameroiden CCD- ja CMOS-kuvakennojen yleisiä toimintaperiaatteita sekä esitellään kennojen tärkeimpiä suorituskykyparametreja.

Luvussa neljä käydään läpi tutkimuksen kohteena oleva korkeiden lämpötilojen mittausmekniikka. Tässä luvussa esitellään työn mittaussovelluksissa käytössä olleet kamerat ja niiden mittausjärjestely. Käytetyt digitaaliset värikamerat olivat muun muassa tieteelliseen käyttöön ja konenäköjärjestelmiin soveltuva CCD-suurnopeuskamera *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* sekä pääasiassa kuluttajakäyttöön ja tavalliseen valokuvaukseen tarkoitettu CMOS-järjestelmäkamera *Nikon D5000*. Työssä kehitettiin käytetyille kameroille suunnitellut laskentaohjelmistot. Ohjelmistojen avulla voidaan laskea kuumien mittauskohteiden pintalämpötiloja ja pintalämpötilajakaumia kameroilla otetuista mittauskuvista. Laskentaohjelmistot sekä ohjelmistoilla suoritettava data-analyysi mittauskuville kehitettiin tätä työtä varten MATLAB-ohjelmointikielen avulla. Kehitetyt ohjelmistot ja niiden ohjelmakoodit esitellään tarkemmin samoin luvussa neljä.

Luvussa viisi esitellään työn sovelluskohteet. Väriavokuvaukseen perustuvaa mittausmekniikkaa sovellettiin kolmeen erilaiseen polttotekniikan tutkimussovellukseen, joissa käytettiin laboratorioreaktoreita. Ensimmäisessä sovelluskohteessa mitattiin yksittäisiä palavia polttoainehiukkasia pudotusputkireaktorissa. Toisessa sovelluskohteessa mitattiin palavan rapsipelletin pintalämpötiloja palamisen eri vaiheissa ja rapsipelletin eri osissa. Kolmannessa sovelluskohteessa tehtiin pohjaselvitystä, miten leijupolttoprosessissa käytettävien kiintoaineiden emissiviteettiarvojen mittaus prosessin palamislämpötiloissa onnistuu väriavokuvausta käyttämällä. Mittausten tarkoituksena kaikissa sovelluskohteissa oli todentaa menetelmän toimivuutta sekä tehdä pohjaselvitystä siitä, millaisiin tutkimussovelluksiin mittausmekniikka voidaan jatkossa hyödyntää. Mittauksissa saavutettuja tuloksia on analysoitu mahdollisimman yleisesti.

Diplomityön lopuksi luvussa kuusi esitetään yhteenveto työn saavutuksista ja pohditaan mittausmekniikan etuja sekä mahdollisia tulevaisuudennäkymiä.

2. OPTINEN PYROMETRIA

Pyrometria on kosketukseton lämpötilan mittaussuomenetelmä. Optisessa pyrometriassa lämpötila mitataan kohteen emittoiman lämpösäteilyn perusteella jonkin optisen mitta-laitteen avulla. Tässä työssä pyrometrialla viitataan aina optiseen pyrometriaan. Pyro-metri on laite, jolla pyrometrian mittaukset suoritetaan. Lämpösäteilyä voidaan havaita ja mitata esimerkiksi optisen valodiodin tai digitaalikameran kuvakennon avulla. Pyro-metria soveltuu erityisesti hyvin kuumien tai nopeasti liikkuvien kohteiden lämpötilojen mittaamiseen. Tämä perustuu siihen, että pyrometriassa mittalaitteen ei tarvitse olla fyys-sisessä kosketuksessa mitattavan kohteen kanssa.

Yksinkertaista kappaleen lämpötilan arviointia on tehty jo pitkään ihmiskunnan histori-assa, sillä hehkuvan kappaleen värin ja kirkkauden on tiedetty liittyvän kappaleen läm-pötilaan. Teoreettisen fysikaalisen pohjan pyrometrialle muodostaa Planckin säteilylaki, jonka saksalainen fyysikko Max Planck (1858–1947) esitteli alun perin vuonna 1900. Planckin lain mukaan kappaleen lämpötilan kasvaessa sen emittoima kokonaissäteily-voimakkuus kasvaa voimakkaasti [1].

2.1 Mustan kappaleen säteily

Kaikki kappaleet lähettävät ympäristöönsä sähkömagneettista säteilyä. Kappaleen emit-toiman säteilyn voimakkuus riippuu sen lämpötilasta. Mitä korkeampi kappaleen läm-pötila on, sitä enemmän se emittoi säteilyä. Lämpötilariippuvuudesta johtuen kappaleen lähettämää säteilyä kutsutaan yleisesti lämpösäteilyksi. Lämpösäteilyn aiheuttavat ai-neen atomeissa ja molekyyileissä kiihtyvässä liikkeessä olevat varaukset (elektronit ja protonit). Varaukset toimivat aineessa värähtelevinä sähköisinä dipoleina. Yksittäisen dipolivärähtelijän emittoiman säteilyn taajuus riippuu värähtelijän energiatilasta [2].

Fysikaalisen systeemin sanotaan olevan termodynaamisessa tasapainotilassa, kun sys-teemin menettämä ja siihen tuleva energiamäärä ovat yhtä suuret. Tällöin termiset ener-giansiirtomekanismit (konvektio, lämmön johtuminen ja lämpösäteily) pysyvät tasapai-nossa ja systeemin lämpötila pysyy vakiona [2] [3]. Termodynaamisessa tasapainossa olevan systeemin kaikki dipolivärähtelijät jakautuvat tiettyihin energiatiloihin Maxwel-lin–Boltzmannin todennäköisyysjakauman perusteella. Termodynaaminen tasapaino on teoreettinen fysikaalinen malli, eikä se esiinny todellisissa systeemeissä täydellisesti. Monet systeemit ovat kuitenkin riittävän lähellä termodynaamista tasapainoa, joten sys-teemin voidaan olettaa olevan tasapainossa.

Mustalla pinnalla tarkoitetaan pintaa, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn. Tällöin pinta ei myöskään heijasta lainkaan säteilyä. Kappaletta, jonka kaikki pinnat ovat mustia, sanotaan mustaksi kappaleeksi. Termodynaamisessa tasapainossa olevan systeemin säteily on mustan kappaleen säteilyä [2]. Pysyäkseen termodynaamisessa tasapainossa kappaleen täytyy emittoida jatkuvasti absorboimansa energiamäärä säteilyä. Näin ollen musta kappale on paitsi täydellinen absorboija, myös täydellinen emittoija. Todellisuudessa mikään kappale ei ole täydellisesti musta kappale, koska reaaliset kappaleet heijastavat aina osan tulevasta säteilystä. Monet kappaleet, esimerkiksi aurinko ja muut tähdet, ovat kuitenkin ominaisuuksiltaan lähellä mustaa kappaletta. Tällöin niitä voidaan mallintaa melko tarkasti ideaalisina mustan kappaleen säteilijöinä.

2.2 Mustan kappaleen säteilylain historiaa

Mustan kappaleen määritteli ensimmäisenä saksalainen Gustav Robert Kirchhoff vuonna 1859. Kirchhoff pystyi todistamaan epäsuorasti väitteen, että mustan kappaleen emittoiman säteilyn intensiteetti riippuu pelkästään kappaleen lämpötilasta ja kappaleen emittoiman säteilyn aallonpituudesta. Mustan kappaleen säteilylakia kehittivät edelleen Joseph Stefan ja Ludwig Boltzmann 1800-luvun loppupuolella. Stefan havaitsi vuonna 1879 kokeellisesti, että mustan kappaleen emittoima säteilyteho pinta-alaa kohden on verrannollinen kappaleen absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin [4]. Boltzmann johti Stefanin tuloksen teoreettisesti vuonna 1884. Tätä tulosta kutsutaan Stefanin–Boltzmannin laiksi, joka esitetään myöhemmin tässä luvussa yhtälössä 2.9.

Saksalainen Wilhelm Wien kehitti kokeellisten tulosten perusteella niin sanotun Wienin siirtymälain vuonna 1893. Laki kertoo mustan kappaleen säteilytehon maksimia vastaavan säteilyaallonpituuden riippuvan lineaarisesti mustan kappaleen säteilijän lämpötilasta (yhtälö 2.6). Wienin lain todettiin pätevän tarkasti vain lyhyillä aallonpituuksilla ja melko matalissa lämpötiloissa. Klassisen fysiikan mallia mustan kappaleen säteilylaiksi kehitti edelleen eteenpäin Lord Rayleigh vuonna 1900. Viisi vuotta myöhemmin Rayleigh ja Sir James Jeans julkaisivat lopullisen muotonsa saaneen Rayleigh’n-Jeansin lain, joka vastaa melko hyvin todellisuutta pitkällä aallonpituuksilla ja korkeissa lämpötiloissa [4]. Lyhyillä aallonpituuksilla Rayleigh’n-Jeansin laki sen sijaan antoi mustan kappaleen säteilyvoimakkuudelle ääretöntä lähestyviä arvoja, mikä on fysikaalisesti mahdotonta. Tätä klassista fysiikkaa vaivannutta ongelmaa kutsuttiin ultraviolettikatastrofiksi [4]. Klassisessa fysiikassa säteilyn oletettiin olevan jatkuvaluonteista, mikä johti mainittuun ultraviolettikatastrofiin.

Vuoden 1900 lopulla Max Planck yritti yhdistää Wienin ja Rayleigh’n tutkimusta kehittämään pätevän teorian mustan kappaleen säteilylaiksi. Planckin tavoitteena oli ratkaista ristiriita, joka vallitsi klassisen fysiikan ja kokeellisten havaintojen välillä. Mustan kappaleen säteilylain johtamisessa Planck teki oletuksen, että säteilevä kappale ei pystykään absorboimaan ja emittoimaan energiaa jatkuvasti, vaan ainoastaan pieninä diskreetteinä energiayksikköinä, eli kvantteina [4]. Planck määritteli matemaattisesti

yhden säteilykvantin, eli fotonin, energian olevan sen taajuuden ν ja luonnonvakion h (Planckin vakio) tulo. Tällä kvanttioletuksella Planck ratkaisi ultraviolettikatastrofiongelman ja mustan kappaleen säteilylaki sai tarkan muotonsa. Planckin kvanttioletuksen myötä käynnistyi kvanttimekaniikan kehittyminen fysiikan historiassa.

2.3 Planckin säteilylaki

Reaallinen kappale emittoi säteilyä, jonka voimakkuus määritellään fysikaalisella suureella $M(T)$, säteilyvoimakkuus. Se tarkoittaa lämpötilassa T säteilevää energiaa aika- ja pinta-ala-yksikköä kohti (W/m^2). Säteilyvoimakkuudelle pätee yhtälö:

$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda, \quad (2.1)$$

missä $M_\lambda(T)$ on spektrinen säteilyvoimakkuus (W/m^3), joka riippuu lämpötilan lisäksi säteilyn aallonpituudesta λ . Mustan kappaleen säteilijän säteilyvoimakkuus määritellään samalla tavalla, mutta sille käytetään merkintää $B(T)$. Reaalisen ja mustan kappaleen säteilyvoimakkuuksien välistä riippuvuutta tarkastellaan myöhemmin luvussa 2.4.

Max Planck esitteli kuuluisan säteilylakinsa artikkelissaan vuonna 1901 [1]. Planck määritteli mustan kappaleen spektrisen säteilyenergian tiheydelle yhtälön, joka on taajuudesta ja lämpötilasta riippuva:

$$u_\nu(T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)}, \quad (2.2)$$

missä ν on taajuus, u_ν on spektrinen säteilyenergian tiheys ($\text{J/m}^3\text{s}^{-1}$), jossa alaindeksi ν tarkoittaa derivaattaa taajuuden suhteen, h on Planckin vakio, c on valon nopeus tyhjiössä, k on Boltzmannin vakio ja T on lämpötila.

Vastaava Planckin yhtälö voidaan kirjoittaa aallonpituudesta riippuvana, jolloin spektrisen säteilyenergian tiheyden u_λ yksikkö on J/m^4 :

$$u_\lambda(T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}. \quad (2.3)$$

Yhtälö 2.3 voidaan johtaa yhtälöstä 2.2, kun tiedetään että taajuudelle pätee tunnettu yhtälö $\nu = c / \lambda$. Taajuuden derivaatta on tällöin $d\nu = - (c/\lambda^2) d\lambda$. Yhtälö 2.3 kuvaa säteilyn energiaa yksikkötilavuutta ja jotain differentiaalista aallonpituusväliä $d\lambda$ kohti.

Käytännössä pyrometrian mittauksissa mitataan säteilytehoa, jonka perusteella kappaleen lämpötila voidaan määrittää. Tällöin on tarkoituksenmukaista siirtyä säteilyenergi-

an tiheydestä (J/m^3) säteilyvoimakkuuteen (W/m^2). Niiden välillä pätee seuraava yhteys [4]:

$$M_\lambda(T) = B_\lambda(T) = \frac{c}{4} u_\lambda(T). \quad (2.4)$$

Yhtälön 2.4 kertoman säteilyenergian tiheyden ja säteilyvoimakkuuden välisen riippuvuuden perusteella saadaan määriteltyä mustalle kappaleelle Planckin lain mukainen spektrinen säteilyvoimakkuus B_λ (W/m^3):

$$B_\lambda(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (2.5)$$

missä $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,74177 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ on Planckin ensimmäinen säteilyvakio ja

$C_2 = (hc)/k = 1,43878 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ on Planckin toinen säteilyvakio. [2]

Kun derivoidaan spektrisen säteilyvoimakkuuden määrittämä yhtälö 2.5 aallonpituuden suhteen ja etsitään tämän derivaatan nollakohta, saadaan määritettyä spektrisen säteilyvoimakkuuden maksimiarvo. Tällöin säteilyvoimakkuuden maksimia vastaavan aallonpituuden ja lämpötilan väliseksi riippuvuudeksi saadaan seuraava yhtälö [4]:

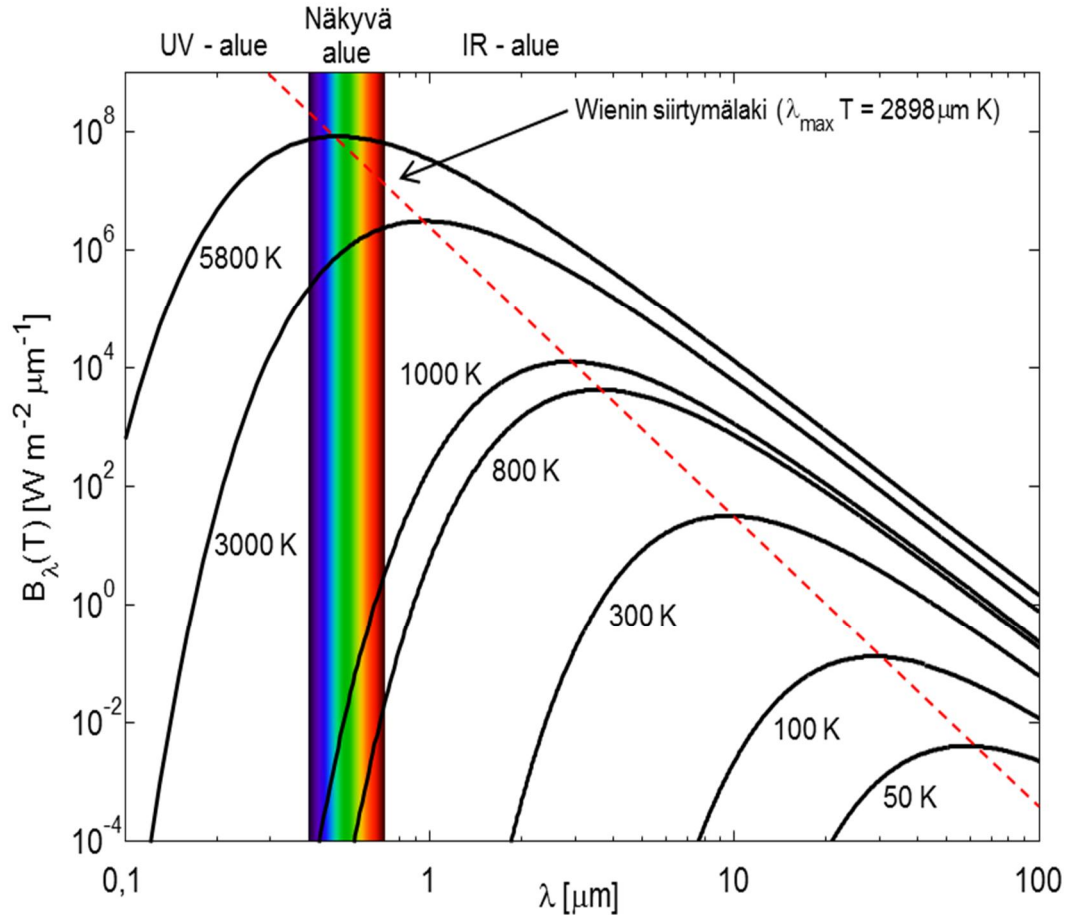
$$\lambda_{\max} T = \frac{hc}{5k} = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (2.6)$$

Yhtälö 2.6 tunnetaan Wienin siirtymälakina, jonka Wilhelm Wien esitti kokeellisten tulosten perusteella jo ennen Planckin lakia. Wienin siirtymälaki kertoo, että lämpötilan kasvaessa voimakkaimman säteilyn aallonpituus λ_{\max} siirtyy kohti lyhyempiä aallonpituuksia [2]. Tätä seikkaa havainnollistaa seuraavan sivun kuva 2.1.

Wienin siirtymälaki on approksimaatio Planckin säteilylaista. Siirtymälain perusteella mustan kappaleen säteilyvoimakkuudelle voidaan johtaa Wienin approksimaatio, joka saa muodon:

$$B_\lambda(T) \approx \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)}, \quad (2.7)$$

Yhtälön 2.7 perusteella Planckin säteilylakia voidaan approksimoida lyhyillä aallonpituuksilla ja matalissa lämpötiloissa. Wienin approksimaation tarkkuus Planckin lakiin verrattuna on parempi kuin yksi prosentti, kun $\lambda T < 3121 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$. [2]

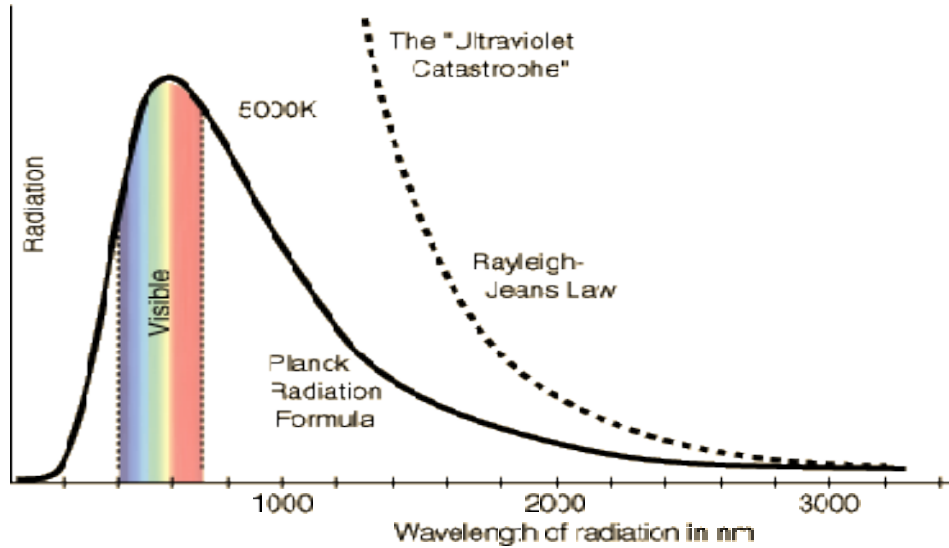


Kuva 2.1 Mustan kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus (Planckin laki) esitettynä aallonpituuden funktiona (logaritminen asteikko) eri lämpötiloissa sekä Wienin siirtymälaki. Kuva on piirretty MATLAB-ohjelmistolla käyttäen esimerkkinä lähteessä [4] julkaistua kuvaa "Figure 3-4". Kuvasta nähdään, että 5800 kelvinasteen käyrän maksimi osuu näkyvän valon aallonpituusalueelle. Auringon pinta-lämpötila on noin 5800 kelvinastetta. 800 kelvinasteen käyrä osoittaa likimääräisen alarajan näkyvän alueen säteilylle.

Planckin säteilylaille voidaan johtaa myös toinen approksimaatio, joka tunnetaan Rayleigh'n-Jeansin lakina. Se on klassisen fysiikan malli mustan kappaleen säteilijälle. Rayleigh'n-Jeansin approksimaatio mustan kappaleen spektriselle säteilyvoimakkuudelle kirjoitetaan muodossa:

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} \quad (2.8)$$

Yhtälöllä 2.8 approksimoidaan Planckin lakia, kun aallonpituus on suuri ($\lambda \gg \lambda_{\max}$). Aallonpituuden pienentyessä klassisen fysiikan mallin mukaan säteilyvoimakkuus kasvaa rajatta, mikä johtaa tunnettuun ultraviolettikatastrofiin. Planckin säteilylaki ratkaisee ultraviolettikatastrofiongelman. Planckin ja Rayleigh'n-Jeansin lakien vertailua sekä ultraviolettikatastrofiongelmaa havainnollistaa seuraavalla sivulla oleva kuva 2.2 [6].



Kuva 2.2 Planckin ja Rayleigh'n-Jeansin lakien vertailua lämpötilassa 5000 K [4][6].

Mustan kappaleen säteilijälle voidaan johtaa kokonaissäteilyvoimakkuus (yhtälö 2.1) integroimalla Planckin spektrinen säteilyvoimakkuus B_λ (yhtälö 2.5) kaikkien aallonpituuksien yli. Tällöin tulokseksi saadaan:

$$B(T) = \int_0^\infty B_\lambda(T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4, \quad (2.9)$$

missä $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ on Stefanin-Boltzmannin vakio. Yhtälö 2.9 tunnetaan Stefanin-Boltzmannin lakina, jonka perusteella mustan kappaleen kokonaissäteilyvoimakkuus riippuu ainoastaan lämpötilasta ja kasvaa hyvin voimakkaasti lämpötilan kasvaessa [3] [4].

2.4 Reaalin säteilijä

Kuten aikaisemmin todettiin, musta kappale on idealisaatio täydellisestä absorboijasta ja täydellisestä emittoijasta. Sen sijaan reaaliiseen kappaleeseen tuleva säteily ei absorboitu kokonaan, vaan osa säteilystä heijastuu kappaleen pinnalta. Reaaliiseen kappaleeseen absorboituneen säteilyn osuus riippuu säteilyn aallonpituudesta, kappaleen lämpötilasta, kappaleen materiaalista sekä sen pinnan ominaisuuksista ja muodoista. Kappaleen absorboiman säteilyn osuus määritellään aallonpituusriippuvalla suureella $\alpha_\lambda(T)$, spektrinen absorbanssi. Se on absorboituneen ja tulevan säteilyn säteilyvoimakkuuksien välinen suhde. Reaalin kappale emittoi säteilyä voimakkuudella $M(T)$, kun taas mustan kappaleen säteilyvoimakkuus on $B(T)$. Näiden säteilyvoimakkuuksien välinen poikkeama esitetään emissiivisyyden $\epsilon(T)$ avulla [2]:

$$\epsilon(T) = \frac{M(T)}{B(T)} \quad (2.10)$$

Emissiivisyys kuvaa kappaleen pinnan ominaisuuksia. Todellisten kappaleiden emissiivisyys riippuu lämpötilan lisäksi säteilyn aallonpituudesta. Silloin emissiivisyys voidaan määritellä spektrisenä suureena $\epsilon_\lambda(T)$ seuraavasti:

$$\epsilon_\lambda(T) = \frac{M_\lambda(T)}{B_\lambda(T)}, \quad (2.11)$$

mistä seuraa, että mustan säteilijän emissiivisyys saa aina arvon yksi, koska se on täydellinen emittoija. Kaikkien muiden kappaleiden emissiivisyys on tätä alhaisempi. Emissiivisyys voi saada dimensiottomia arvoja nollan ja yhden väliltä. Se kertoo siis miten tehokkaasti jokin kappale emittoi säteilyä mustaan kappaleeseen verrattuna. Jos emissiivisyys on pienempi kuin yksi ja lisäksi riippumaton säteilyn aallonpituudesta, on kyseessä niin sanottu harmaa säteilijä. Todellisia kappaleita voidaan usein kuvata hyvällä tarkkuudella vähintään jollain kapealla aallonpituusvälillä harmaina säteilijöinä. Tällöin kyseisellä aallonpituusvälillä kappaleen emissiivisyys ei muutu, jos kappaleen lämpötila pysyy myös vakiona. Termodynaamisessa tasapainossa kappaleeseen tulevan ja sieltä lähtevän säteilyn täytyy olla yhtä suuret:

$$B_\lambda(T) = (1 - \alpha)B_\lambda(T) + \epsilon B_\lambda(T) \quad (2.12)$$

Yhtälöstä 2.12 seuraa, että termodynaamisessa tasapainossa absorbanssi ja emissiivisyys ovat yhtä suuret. Tämä tunnetaan Kirchhoffin lakina: $\alpha(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T)$. [2]

Emissiivisyyden määritelmän perusteella reaalisen ja ei-harmaan kappaleen spektrinen säteilyvoimakkuus lämpötilassa T voidaan kirjoittaa:

$$M_\lambda(T) = \epsilon_\lambda(T) \cdot B_\lambda(T) = B_\lambda(T_b), \quad (2.13)$$

missä T_b on kirkkauslämpötila. Kirkkauslämpötila kertoo lämpötilan, jossa musta kappale säteilisi tietyllä aallonpituudella yhtä voimakkaasti kuin todellisessa lämpötilassa T oleva reaalinen kappale. Kirkkauslämpötilalle pätee ehto: $T_b < T$. Yhtälö 2.13 voidaan kirjoittaa Wienin approksimaation (yhtälö 2.7) perusteella muotoon:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} = \frac{\lambda}{C_2} \ln[\epsilon_\lambda(T)], \quad (2.14)$$

josta nähdään kirkkauslämpötilan ja todellisen lämpötilan välinen riippuvuussuhde emissiivisyydestä ja mittausaallonpituudesta [2].

Kun määritetään reaalisen ja ei-harmaan kappaleen todellista lämpötilaa sen emittoiman säteilyn perusteella, täytyy kappaleen emissiokerroin (emissiivisyys) käytetyillä aallonpituuksilla tuntea. Käytännön pyrometriassa mittauskohteiden emissiokertoimia ei kuitenkaan aina tiedetä tarkasti. Lämpötilan määrittämiseksi tehdään tällöin arvio kappaleen emissiivisyydestä ja oletetaan se aallonpituusriippumattomaksi vakioksi. Silloin siis mitattavaa kohdetta mallinnetaan harmaana säteilijänä. Harmaan säteilijän lämpötila

voidaan määrittää pyrometrian keinoin, vaikka emissiokertoimen arvoa ei tunnettaisikaan.

2.5 Pyrometrinen lämpötilan määrittäminen

Lämpötila on yksi tärkeimmistä mitattavista fysikaalisista suureista, koska useat luonnonilmiöt perustuvat aineen lämpötilan vaihteluihin. Esimerkiksi monien fysikaalisten ja kemiallisten prosessien eteneminen johtuu prosessissa tapahtuvista lämpötilan muutoksista. Useissa teollisuusprosesseissa lämpötilan luotettava ja tarkka mittaaminen on välttämätöntä. Käytettävä mittaussuunnitelma riippuu aina mittaustilanteesta ja mitattavan kohteen luonteesta. Polttotekniikan palamismalleissa lämpötila on oleellinen parametri. Numeeristen palamismallien avulla voidaan optimoida polttoaineen palamisolosuhteita. Pyrometrinen lämpötilan määrittäminen on siksi tärkeää erilaisissa polttotekniikan sovelluskohteissa.

Pyrometria on kosketukseton mittaussuunnitelma. Mittalaitteen anturin ei tarvitse olla fyysisessä kosketuksessa mitattavan kappaleen kanssa. Anturi ei aiheuta tällöin häiriöitä itse mitattavaan kappaleeseen ja siten itsessään se ei vaikuta kappaleen lämpötilaan. Pyrometrian avulla voidaan mitata hyvin kuumienkin kappaleiden lämpötiloja vaurioittamatta mittalaitteen anturia. Tämä on suunnitelman yksi huomattavista eduista. Pyrometria on myös nopea mittaussuunnitelma. Se mahdollistaa nopeasti muuttuvien lämpötilojen ja myös liikkuvien kohteiden mittaamisen reaaliajassa.

Perinteisissä kohteen kanssa kosketuksissa olevissa lämpötilan mittaussuunnitelmissä (esim. elohopealämpömittari) mittarin ja kohteen täytyy saavuttaa terminen tasapaino keskenään, jotta mittaussuunnitelman oikea lämpötila saadaan mitattua tarkasti. Termisen tasapainon saavuttamiseen kuluu aina hieman aikaa. Pyrometriassa mitataan kohteen emittoimaa lämpösäteilyä, joka muunnetaan sähköiseksi signaaliksi. Tällöin termistä tasapainoa ei tarvitse saavuttaa ja hitausongelmaa ei esiinny. Jotta pyrometrinen lämpötilamittaus onnistuu, täytyy lämpösäteilyä mittaavalla optisella detektorilla (yleisimmin valodiodilla tai kamerakennolla) olla suora näköyhteys kohteeseen. Jos näköyhteyttä ei ole, niin kohteesta tuleva säteily voidaan johtaa detektorille valokuitua pitkin tai esimerkiksi peilien avulla.

Pyrometri on laite, jolla mitataan kuumien kappaleiden emittoimaa lämpösäteilyä. Mittaustuloksista voidaan määrittää kappaleen lämpötila Planckin säteilylain (luku 2.3) perusteella. Pyrometrit voidaan jakaa karkeasti kahteen eri tyyppiin: kokonaissäteilypyrometrit ja rajoitetun kaistan pyrometrit. Kokonaissäteilypyrometreillä säteilyä mitataan hyvin laajalla aallonpituuskaistalla. Rajoitetun kaistan pyrometreillä säteilyä mitataan sen sijaan yhdellä tai useammalla kapealla kaistalla. Kaistojen lukumäärän mukaan rajoitetun kaistan pyrometrit voidaan jakaa vielä yksi-, kaksi- ja moniväripyrometreihin [2]. Yksiväripyrometriassa mitattavan kappaleen emissiivisyydelle oletetaan vakioarvo, jotta lämpötila pystytään määrittämään. Spektrinen säteilyvoimakkuus mitataan yhdellä ka-

pealla aallonpituuskaistalla, jolloin mittaus antaa tulokseksi kappaleen kirkkauslämpötilan T_b kyseisellä aallonpituudella. Kirkkauslämpötilan erotus kappaleen todellisesta lämpötilasta voidaan sitten laskea yhtälöstä 2.14. Yksiväripyrometrian mittausvirhe on sitä suurempi mitä enemmän kappaleen todellinen emissiivisyys poikkeaa ykkösestä [2]. Yksiväripyrometriassa on siis tärkeää tuntea mitattavan kohteen emissiivisyys.

2.6 Kaksiväripyrometria

Kaksiväripyrometria on yleinen korkeiden lämpötilojen mittausmenetelmä. Se perustuu säteilyvoimakkuuksien mittaamiseen kahdella toisiaan lähellä olevalla kapealla aallonpituuskaistalla. Mitattavan kappaleen lämpötila voidaan kaksiväripyrometriassa määrittää aallonpituuskaistojen spektristen säteilyvoimakkuuksien suhteesta:

$$\frac{M_{\lambda_1}(T)}{M_{\lambda_2}(T)} = \frac{\epsilon_{\lambda_1}(T) \cdot B_{\lambda_1}(T)}{\epsilon_{\lambda_2}(T) \cdot B_{\lambda_2}(T)} = \frac{B_{\lambda_1}(T_c)}{B_{\lambda_2}(T_c)}, \quad (2.15)$$

missä T_c on laskennallinen lämpötila, jota sanotaan värilämpötilaksi. Jos kappale on harmaa tai musta säteilijä, niin $\epsilon_{\lambda_1}(T) = \epsilon_{\lambda_2}(T)$, jolloin värilämpötila T_c on sama kuin todellinen lämpötila T . Mustan ja harmaan kappaleen todellinen lämpötila voidaan siten määrittää kaksiväripyrometrian avulla, vaikka emissiokertoimen arvoa ei tunnettaisikaan. Muussa tapauksessa, kun emissiivisyydet ovat erisuuruiset käytetyillä mittausaallonpituuksilla, laskennallinen värilämpötila poikkeaa kappaleen todellisesta lämpötilasta.

Ei-harmaille kohteille värilämpötilan poikkeama todellisesta lämpötilasta saadaan yhtälön 2.16 perusteella käyttämällä Wienin approksimaatiota (yhtälö 2.7) Planckin laista:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{1}{C_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \left[\frac{\epsilon_{\lambda_1}(T)}{\epsilon_{\lambda_2}(T)} \right] \quad (2.16)$$

Värilämpötilan ja todellisen lämpötilan välisen eron suuruuteen vaikuttaa siis emissiivisyyseron lisäksi mittausaallonpituuksien valinta. Värilämpötila ja aikaisemmin käsitelty kirkkauslämpötila ovat säteilymittausten perusteella laskettuja suureita. Nämä poikkeavat kappaleen todellisesta lämpötilasta aina silloin kun emissiivisyys on erisuuruinen kuin mittauksissa on oletettu. Jos mitataan harmaata kappaletta, niin kappaleen emissiokertoimen arvo mittausaallonpituudella λ voidaan laskea lämpötilan määrittämisen jälkeen yhtälön 2.17 perusteella:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(T)}{F_\lambda(T)} \quad (2.17)$$

Yhtälöön 2.17 sijoitetaan mittauskohteesta mitattu säteilyvoimakkuus M_λ määritetyssä lämpötilassa ja pyrometrin kalibroitu vastefunktio F_λ kyseisessä lämpötilassa [2].

Optisen pyrometrian ominaisuudet tekevät siitä hyödyllisen menetelmän muun muassa nopeasti liikkuvien kohteiden sekä nopeasti muuttuvien lämpötilojen reaaliaikaiseen mittaamiseen. Pyrometrian menetelmillä voidaan suorittaa mittauksia haastavissa mittausolosuhteissa hyvin kuumistakin kohteista. Tällaisia mittausolosuhteita esiintyy esimerkiksi monissa energia- ja polttotekniikan tutkimussovelluksissa. Pyrometrialla voidaan mitata muun muassa yksittäisten liikkuvien polttoainepartikkelien pintalämpötiloja kesken niiden palamisreaktion. Tämän työn yhtenä mittaussovelluksena tutkitaankin palavien polttoainepartikkelien mittaamista värivalokuvaukseen perustuvan kaksiväripyrometrian keinoin (luku 5.1). Värivalokuvaukseen perustuvassa pyrometriassa, eli värikamerapyrometriassa, optisena ilmaisimena käytetään yksittäisen valodiodin sijasta digitaalikameran kuvakennoa. Värikamerapyrometrian avulla voidaan mitata kuumien mittaushaasteiden lämpötilajakaumia jopa reaaliaikaisesti. Tällöin digitaalikamera toimii menetelmässä lämpökameran tavoin.

3. DIGITAALINEN VALOKUVAUS

Digitaalikamerat alkoivat yleistyä 1990-luvun lopulla alkaneen valokuvauksen digitalisoitumiskehityksen myötä. Viime vuosina digitaalisen valokuvauksen suosio on kasvanut räjähdysmäisesti sen voimakkaan kaupallistumisen myötä. Jo vuonna 2003 digitaalikameroiden myynti ohitti perinteisten analogisten filmikameroiden myynnin, ja nykyään digivalokuvauksen ja internetin vallankumous onkin muuttanut visuaalisen maailmamme lopullisesti [7]. Digivalokuvauksen suosiosta kertoo muun muassa se, että arvioiden mukaan vuonna 2014 maailmassa otettiin yhteensä peräti noin 880 miljardia valokuvaa [8]. Määrä on valtava johtuen muun muassa suuren suosion saavuttaneista nykyaikaisista älypuhelimista ja tablettitietokoneista. Näissä mobiililaitteissa on nykyään kutakuinkin aina sisäänrakennettuna digitaalikamera sosiaalisen median kuvanjakopalveluihin.

Tässä tutkielmassa tutustutaan kosketuksettomaan korkeiden lämpötilojen mittaukseen, joka perustuu digitaaliseen värivalokuvaukseen. Digitaalikameran avulla suoritettavia pyrometrian mittauksia kutsutaan yleisesti joko kuvantavaksi pyrometriaksi tai kamera-pyrometriaksi. Lämpötilamittaus digitaalisella värikameralla pohjautuu kaksiväripyrometrian teoriaan. Siinä mittauskohteesta emittoituvan lämpösäteilyn voimakkuus määritetään kahdella eri aallonpituuskaistalla pitäen lämpötilaa vakiona. Kuuman mittauskohteen emittoima lämpösäteily voidaan erottaa värikameran optisen ilmaisimen, eli kuvakennon, toiminnan avulla kolmelle eri valon värikanavalle. Värikanavat ovat päävärien mukaisesti: punainen, vihreä ja sininen. Kaksiväripyrometrian teorian mukaisesti lämpötilamittaukseen värikameralla käytetään kennon kahta värikanavaa. Tässä työssä käytetty korkeiden lämpötilojen (yli 400 °C) mittaustekniikka esitellään tarkemmin työn seuraavassa luvussa 4.

Värikameroiden piistä valmistetut kuvakennot ovat yleisesti joko CCD (engl. *Charge Coupled Device*) - tai CMOS (engl. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) - arkkitehtuuriin perustuvia. Kuvakenno pystyy absorboimaan mittauskohteesta saapuvia fotoneja havaittavasti 300 – 1100 nanometrin aallonpituusalueelta. Tämä aallonpituusalue perustuu piin optisiin ominaisuuksiin [9]. Tässä työn luvussa 3 selvitetään ja vertaillaan digitaalikameroiden CCD- ja CMOS-kuvakennojen yleisiä toimintaperiaatteita sekä esitellään kennojen tärkeimpiä suorituskykyparametreja. Tässä luvussa selitetään myös miten värikuva digitaalikameroissa tuotetaan.

3.1 Valoherkkä kenno

Valoherkkä kenno on digitaalikameran kuvasensori. Sen toiminta perustuu puolijohdetekniikkaan. Kenno rakentuu matriisimuotoon järjestetyistä valoherkistä elementeistä,

joita kutsutaan pikseleiksi. Digitaalikameralla otettu kuva muodostuu valoherkän kennon pikselien mittaaman valon määrän perusteella. Valoherkkiä kennoja valmistetaan erilaisiin arkkitehtuureihin perustuen. Eri arkkitehtuurit käsittelevät pikseleissä muodostuneita varauksia eri tavoin. Vakiintuneimmat kennoarkkitehtuurit ovat: varauskytketty piiri (CCD) ja komplementaarinen metallioksidipuolijohde (CMOS) [9]. CCD-tyypin kennolla varaukset siirretään kaikilta pikseleiltä aluksi käsittelyä varten erilliseen siirto-rekisteriin, jossa ne muunnetaan lopuksi digitaaliseen muotoon. CMOS-tyypin kennolla varaukset käsitellään sen sijaan pikselikohtaisesti. CMOS-kennon jokainen pikseli sisältää elektronisen piirin, joka muuntaa varauksen jännitteeksi ja suorittaa signaalin vahvistuksen. Kennotyyppien yksityiskohtaisempia fysikaalisia ominaisuuksia käsitellään myöhemmin alaluvuissa 3.6 ja 3.7. Valoherkkien kuvakennojen ominaisuudet ja laatu-tekijät ovat määrääviä tekijöitä kamerapyrometrian mittaustarkkuudessa.

Digitaalikuvauksessa kohteesta tuleva säteilyvuo johdetaan valoherkälle kennolle kameran objektiivin kautta. Kenno kerää sen puolijohdeilmaisimien pinnoille osuvat fotonit ja muuntaa ne sähköisiksi varauksiksi, eli elektroneiksi. Tällöin elektronit virittyvät kennon puolijohdeissa valenssivyöltä johtavuusvyölle [9]. Sähköisen signaalin sisältämä kuvainformaatio tallennetaan tämän jälkeen bitteinä kameran massamuistiin A/D-muuntimen kautta. Kameran tallentama kuvainformaatio on näytteistetty paikan suhteen. Näytteistäminen suoritetaan pikselimatriisilla, jossa olevat pikselit mittaavat siihen tulevien fotonien lukumäärää kameran elektroniikan ohjaaman valotuksen ajan. Digitaalikameran tuottama kuva muodostuu siten valoherkän kennon mittaamasta pikselimatriisista. Kennon jokainen pikseli mittaa siihen tulevaa valon määrää puolijohdeilmaisimen avulla. Jokainen pikseli sisältää yhden puolijohdeilmaisimen. Pikselit ovat fyysiseltä kooltaan hyvin pieniä, tyyppillisesti muutamia mikrometrejä leveitä ja korkeita.

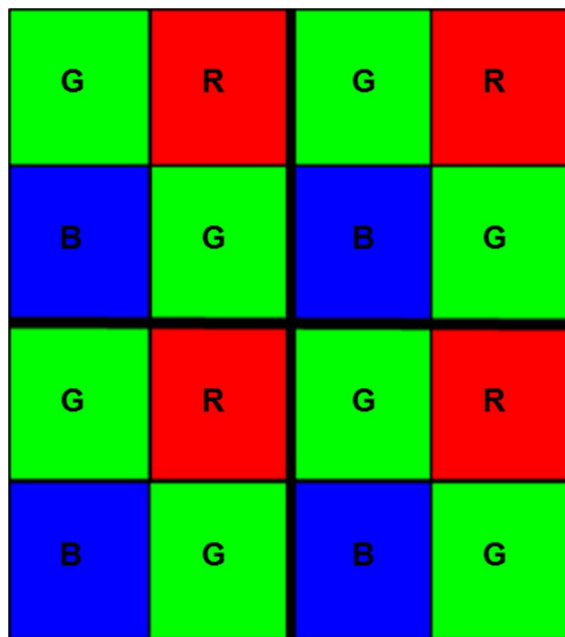
Kennon pikselit eivät havaitse kaikkia niihin osuvia fotoneja. Spektrinen kvanttihyötysuhde (engl. *quantum efficiency*, *QE*) määrittelee kuinka suuren osan yksittäinen pikseli pystyy havaitsemaan kunkin aallonpituuden fotoneista. Koko valoherkän kennon kvanttihyötysuhde poikkeaa yksittäisen pikselin kvanttihyötysuhteesta. Koko kennon kvanttihyötysuhde määritellään pikselin kvanttihyötysuhteen ja kennon optisen hyötysuhteen tulona. Optinen hyötysuhde kuvaa häviöitä, joita fotonivuo kokee kennossa ennen osumista puolijohdeilmaisimelle [10]. Kennon kvanttihyötysuhde on yksi tärkeimmistä valoherkän kennon suorituskykyä kuvaavista parametreista.

3.2 Värikuvan tuottaminen digitaalikamerassa

Valoherkällä kennolla olevat pikselit eivät yksinään havaitse kuvauskohteen värejä, vaan kohteesta muodostuu harmaasävykuva kennon mittaaman säteilyvoimakkuuden perusteella. Digitaalikameran tuottama värikuva muodostuu kennon pikselien päälle sijoitettujen värisuodinelementtien avulla [9]. Värisuodinelementtijoukkoa kutsutaan värimosaiikkimatriisiksi (engl. *color filter array*, *CFA*). Värimosaiikkimatriisi on lami-noitu kennon pinnalle siten, että yksi matriisin värielementti peittää aina yhden kennon

pikselin. Tällöin kennon jokainen pikseli on herkkä pelkästään yhden väristä säteilyä vastaavalle aallonpituuskaistalle.

Värisuodinmatriisissa on yleensä kolmelle päävärille (punainen, vihreä ja sininen) herkkiä elementtejä ryhmiteltynä neljän elementin ryhmiin [11] [12]. Jos yhdessä neljän elementin ryhmässä on kaksi vihreälle, yksi punaiselle ja yksi siniselle valolle herkkää elementtiä, sanotaan järjestelyä Bayer-matriisiksi (kuva 3.1). Se on erittäin yleinen värikuvan tuottamistekniikka nykyaikaisissa digitaalikameroissa. Kuvan 3.1 mukaiset neljän värielementin ryhmät toistuvat värimosaiikkimatriisissa samassa järjestyksessä kattaen kennon koko alan. Bayer-matriisi on saanut nimensä keksijänsä Bryce Bayernin (Eastman Kodak Company) mukaan [11].



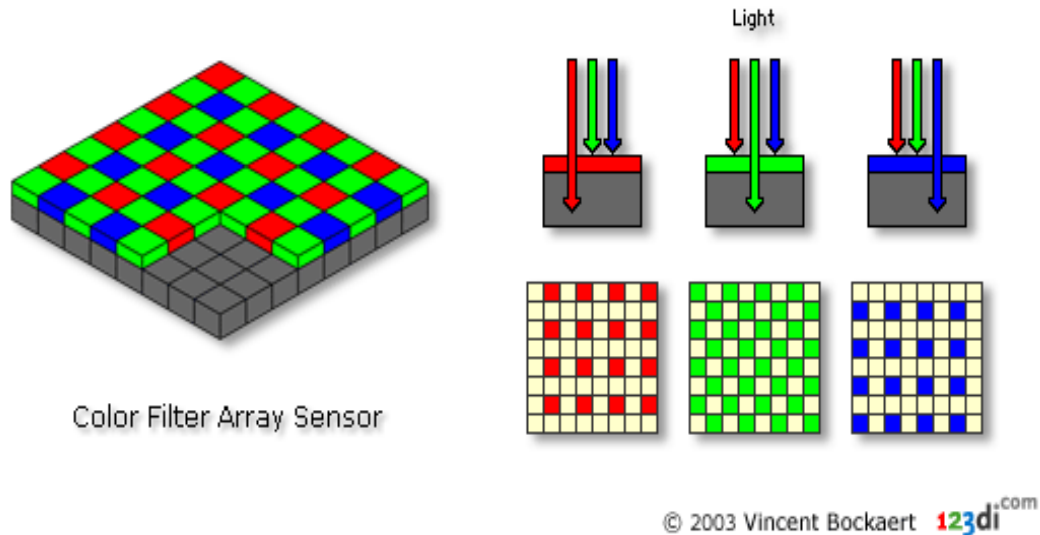
G	R	G	R
B	G	B	G
G	R	G	R
B	G	B	G

Kuva 3.1 Värisuodinelementtien järjestäytyminen Bayer-matriisissa. Kuvassa on neljä kappaletta neljästä värielementistä koostuvia ryhmiä [11].

Bayer-matriisia kutsutaan yleisesti myös RGB-matriisiksi sen sisältämien värielementtien perusteella. Bayer käytti matriisissaan kaksi kertaa enemmän vihreitä värielementtejä kuin punaisia ja sinisiä jäljitelläkseen ihmissilmän fysiologiaa. Sen mukaan silmän verkkokalvon tappisolut ovat päivänvalossa herkimpiä vihreälle valolle [12] [13]. Bayer-matriisista käytetään muitakin versioita värisuodinelementtien järjestäytymiselle, mutta yllä olevan kuvan 3.1 mukainen järjestely on hyvin yleinen. Bayer-matriisissa on aina joka tapauksessa kaksi kertaa enemmän vihreitä värielementtejä kuin punaisia ja sinisiä [9] [13].

Jokainen valoherkän kennon pikseli pystyy havaitsemaan vain yhtä väriä kolmesta pääväristä. Kennon mittaamasta kuvadatasta puuttuu tällöin jokaisesta pikselistä kahden muun päävärin arvot, kuten seuraavan sivun kuvasta 3.2 havaitaan. Lopullinen täysväri-

kuva digitaalikamerassa muodostetaan interpolaatioalgoritmin (engl. *demosaicing*) avulla. Algoritmin perusteella puuttuvat väriarvot interpoloidaan jokaiselle pikselille vierekkäisistä pikseleistä. Yleisin interpolaatiomenetelmä on bilineaarinen interpolointi, jossa pikselin puuttuvat väriarvot lasketaan neljän lähimmän pikselin etäisyyksillä painotettuna väriarvojen keskiarvona [13]. Interpoloinnin avulla jokaiselle valoherkän kennon pikselille muodostuu kuvapikseliarvo, joka on kombinaatio kolmesta pääväristä. Jokainen kuvapikseli esitetään lopullisessa kuvadatassa väriarvokolmikolla: (R, G, B).



Kuva 3.2 Värien taltiointi digitaalikamerassa Bayer-matriisin avulla [14].

3.3 Kennon herkkyys

Valoherkän kennon herkkyys kuvaa sitä, miten suuren signaalin tietty valomäärä saa kennolla aikaiseksi. Kennon herkkyyden määrää pitkälti siinä olevien yksittäisten pikselien fyysinen koko, koska isompaan pinta-alaan osuu enemmän fotoneita kuvattavasta kohteesta [15]. Herkkyys määräytyy kennon rakenteesta, pikselien pinta-alasta ja kennon kvanttihyötysuhteesta. Itse kennon rakenteesta riippuva peruserkkyys pysyy siis vakiona, mutta kennolta lähtevää signaalia voidaan vahvistaa kasvattamalla kennon sähköistä vahvistusta kameran ohjainelektroniikan avulla. Kennon sähköistä vahvistusta kuvataan ISO-arvolla (ISO-standardointijärjestön määrittelemä standardi) [16]. ISO-arvoa säätämällä voidaan kuvan kirkkauteen vaikuttaa samalla tavalla kuin kameran objektiivin aukkoa tai valotusaikaa (suljinaikaa) muuttamalla. Mitä suuremmaksi ISO-arvo säädetään, sitä vähemmän kenno tarvitsee valoa kuvan muodostamiseksi. Herkkyysasetukseksi kutsuttavan ISO-arvon kasvattaminen vastaa kirkkauden lisäämistä kuvaan jälkikäteen kuvankäsittelyn avulla.

Herkkyysasetus on sidoksissa kameran valotusaikaan, sillä ISO-arvon kaksinkertaistuminen puolittaa tarvittavan valotusajan. ISO-arvoa voidaan nykyisissä järjestelmäkame-

roissa säätää yleisimmin välillä 100 – 6400. Laadukkaimmissa ammattilaiskameroissa herkkyysasetuksen säätöalue on tätäkin laajempi. Kun otetaan kuvia niukassa valaistuksessa, täytyy kennon herkkyysasetusta usein kasvattaa, jotta saadaan kuva erottumaan mustasta taustasta. Liian suurta ISO-arvon käyttöä tulisi kuitenkin välttää, sillä sen tavoittelu tuo kuvaan usein satunnaista häiriösignaalia, eli kohinaa. Parhaaseen kuvanlaatuun päästäänkin, kun pyritään käyttämään mahdollisimman pieniä ISO-arvoja. Niukassa valaistusolosuhteessa pienten herkkyysasetusten käyttäminen on kuitenkin usein mahdotonta johtuen taltioituvan valon pienemmästä määrästä. Suurilla herkkyysasetuksilla tuotetuissa kuvissa kohinan määrä on siis yleensä suurempi.

Kennon ja sen pikselien herkkyyteen vaikuttaa siis oleellisesti kennon ja sen pikselien koko. Mitä isompia kennon pikselit ovat pinta-alaltaan, sitä enemmän fotoneja ne pystyvät havaitsemaan annetussa ajassa. Yksittäisellä pikselillä on rajallinen maksimivarauskapasiteetti, jota kutsutaan englanninkielisellä termillä *full well capacity* [9]. Se kertoo mikä on maksimivaramäärä, jonka pikseli pystyy siihen osuvia fotoneja keräämään ja varastoimaan ennen saturoitumistaan. *Full well capacity* ilmoitetaan elektronien lukumääränä. Mitä isompi pikseli on pinta-alaltaan, sitä suurempi on sen maksimivarauskapasiteetti.

Pikselikoon kasvaessa kennon muodostaman signaalin suuruus kasvaa, jolloin myös signaalin suhde sen kohinatasoon kasvaa. Suurinta kennolla havaittavissa olevaa signaalia rajoittaa kennon saturoituminen. Kennon havaitsemaa äärellistä maksimivarauskapasiteettia merkitään termillä Q_{sat} . Pikselit muodostavat myös valaistuksesta riippumattoman signaalin, jota kutsutaan pimeävirraksi i_{dark} . Pimeävirta aiheuttaa signaaliin offset-tason, joten se pienentää suurinta kennolla havaittavissa olevaa varausta Q_{max} . Yhtälö 3.1 määrittää kennon muodostaman suurimman havaittavissa olevan varauksen suuruuden, jos oletetaan että pimeävirta pysyy koko valotusajan t_{int} vakiona [9] [15]:

$$Q_{max} = Q_{sat} - i_{dark}t_{int} \quad (3.1)$$

3.4 Kohina

Kennon muodostamassa signaalissa on aina mukana myös satunnaista häiriösignaalia, kohinaa. Kohina heikentää kennon suorittaman kuvauksen suorituskykyä. Signaalissa olevan kohinan määrä riippuu pääasiassa kennon ja sen pikselien koosta sekä kennon vahvistuksen määräävästä ISO-arvosta [9]. Kennon pikselien koko vaikuttaa kennon muodostaman signaalin suuruuteen ja sitä myöten siinä esiintyvän kohinan suuruuteen. Signaali-kohinasuhde (engl. *Signal to Noise Ratio*, *SNR*) kuvaa kennon muodostaman signaalin hyvyttä [17]. Se määritellään signaalin tehon suhteena siinä esiintyvän kohinan tehoon. Signaali-kohinasuhde ilmoitetaan yleisesti desibeleinä (dB). Signaali-kohinasuhteen suuruus on tärkeä parametri kennon suorituskykyä määritettäessä.

Valoherkällä kennolla syntyvä kohina voidaan jakaa toisistaan riippumattomiksi komponenteiksi, joita ovat aika- ja kuvakohina [9]. Aikakohina aiheuttaa yksittäisen pikselin muodostamaan signaaliin komponentin, joka vaihtelee ajan suhteen. Kuvakohinan aiheuttaa signaalin vaihtelu kennon eri pikselien välillä. Kohinan suuruuteen eniten vaikuttavat tekijät ovat käytetty valotusaika ja siitä riippuva kennolle tuleva valaistusvoimakkuus. Kohina voi olla joko valaistuksesta riippumatonta tai siitä riippuvaa. Huonoissa valaistusolosuhteissa kennon kohinaa hallitsee valaistuksesta riippumattomat kohinalähteet. Valaistuksen kasvaessa kohinan hallitseva lähde on valaistuksesta riippuva fotoniraekohina [9] [17].

Kohinalähteet jaetaan yleisesti ottaen kolmeen eri tyyppiin. Niitä ovat pimeävirran kohina (engl. *dark current noise*), lukukohina (engl. *readout noise*) ja fotoniraekohina (engl. *photon shot noise*) [17]. Pimeävirran kohina on termistä kohinaa, joka aiheutuu kennon varauksenkuljettajien lämpöliikkeestä. Sen suuruus riippuu kennon lämpötilasta ja valotusajasta. Valotusaikaa kasvattaessa pimeävirran kohina lisääntyy, koska tällöin varauksenkuljettajien lämpöliikkeen aiheuttama elektronin viritys ehtii tapahtua useammin [9]. Lukukohina syntyy kennon lukuelektroniikan aiheuttamasta kohinasta. Kennon lukuelektroniikka muuntaa fotonit elektroneiksi ja suorittaa A/D-muunnoksen. Lukuprosessissa syntyy aina lukukohinaa, jota kutsutaan myös kennon pohjakohinaksi. Mitä nopeammin kenno suorittaa lukuprosessin, sitä enemmän lukukohinaa syntyy. Hitaampi lukuprosessi on siis parempi lukukohinan kannalta. Pimeävirran kohina ja lukukohina aiheutuvat kennon rakenteesta itsestään, ja sitä voidaan vähentää kennon sopivalla suunnittelulla.

Fotoni-raekohina aiheutuu kennon keräämän fotonivuon tilastollisesta luonteesta. Fotonit osuvat kennon pikseleille satunnaisin väliajoin. Fotoni-raekohina on kaikille pikseleissä oleville puolijohdeilmaisimille ominaista kohinaa, jonka esiintymistä ei voida estää. Fotoni-raekohinan suuruus on verrannollinen kennon muodostamien elektronien lukumäärän neliöjuureen. Valaistuksen kasvaessa kenno muodostaa fotoneista enemmän elektroneja, jolloin fotoniraekohinan suuruus kasvaa. Valaistuksesta riippuvan fotoniraekohinan suuruus on siis suoraan verrannollinen kennon muodostamaan signaaliin. Kennon muodostaman signaalin suuruutta kuvataan signaalissa olevien elektronien lukumäärällä N_e . Kennon yksittäiselle pikselille osuu fotoneja lukumäärä P (fotonien määrä / pikseli / sekunti). Signaalin suuruus määritellään yhtälöllä 3.2:

$$N_e = PD_{QE}t_{int}, \quad (3.2)$$

missä D_{QE} on kennon kvanttihyötysuhde (= ftonia kohti syntyvien elektronien määrä kennolla) ja t_{int} on integrointiaika [17]. Fotoni-raekohinan suuruus δ_{signal} yksittäisen pikselin muodostamassa signaalissa on yhtälön 3.3 mukainen:

$$\delta_{signal} = \sqrt{N_e} = \sqrt{PD_{QE}t_{int}} \quad (3.3)$$

Muut kohinalähteet ovat pimeävirran kohina, jonka suuruus on δ_{dark} sekä lukukohina suuruudeltaan $\delta_{readout}$. Yhdistämällä eri kohinalähteet voidaan kennon signaali-kohinasuhde SNR määritellä yhtälön 3.4 perusteella [9] [17]:

$$SNR = \frac{PD_{QE} t_{int}}{\sqrt{(\delta_{dark}^2 + \delta_{readout}^2 + \delta_{signal}^2)}} \quad (3.4)$$

Kennon signaali-kohinasuhde saa yhtälön 3.5 mukaisen muodon, kun sijoitetaan eri kohinalähteiden suuruudet yhtälöön 3.4:

$$SNR = \frac{PD_{QE} t_{int}}{\sqrt{N_{dark} t_{int} + \delta_{readout}^2 + PD_{QE} t_{int}}} \quad (3.5)$$

Yhtälössä 3.5 termi N_{dark} on pimeävirran suuruus (elektronien määrä / pikseli / sekunti) ja $\delta_{readout}$ on lukukohinan suuruus (elektronien määrä / pikseli). Pimeävirran kohinaa voidaan vähentää laskemalla kennon lämpötilaa. Jäähdyttämällä kenno -30 °C :een pimeävirran kohinan suuruus muuttuu merkityksettömäksi [18]. Ideaalitilanteessa signaalissa oleva kohina aiheutuu pelkästään fotoniraekohinasta. Esimerkiksi signaalin suuruuden ollessa 100 elektronia, teoreettinen signaali-kohinasuhteen maksimiarvo on tällöin $\sqrt{100} = 10$. Huonossa valaistusolosuhteessa kennolle tai pikselille tulevan fotonivuon suuruus on pieni, jolloin fotoniraekohinan suuruus muihin kohinalähteisiin suhteutettuna on pieni [17]. Jos kenno on jäähdytetty, niin niukassa valaistuksessa hallitseva kohinalähde on lukukohina. Lukukohina asettaa signaalille tässä tapauksessa havaintorajan. Lukukohinan suuruutta voidaan pienentää muokkaamalla kennon suoritamaa lukuprosessia hitaammaksi, tai ainakin pyrkiä välttämään liian suuria lukunopeuksia.

3.5 Dynaaminen alue

Kuvakennon kykyä tallentaa erisuuria valaistusarvoja digitaaliseen valokuvaan havainnollistetaan termillä: dynaaminen alue (engl. *dynamic range*). Se määritellään kuvassa havaittavissa olevan suurimman ja pienimmän valaistusvoimakkuuden suhteena. Suurin mahdollinen valaistusvoimakkuus vastaa tilannetta, jolloin pikseli saturoituu (maksimivarauskapasiteetti täyttyy) ja pienin mahdollinen valaistusvoimakkuus tilannetta, jolloin signaali ja kohina ovat yhtä suuria. Kennon dynaamisen alueen suuruus voidaan esittää teoreettisesti yhtälön 3.6 avulla:

$$\text{Dynaaminen alue} = \text{Maksimivarauskapasiteetti} / \text{Lukukohina} \quad (3.6)$$

Yhtälössä 3.6 kennon maksimivarauskapasiteetti (*full well capacity*) ja lukukohina (*readout noise*) määritellään elektronien lukumääränä [15] [18]. Lukukohinaa voidaan kutsua tässä myös pohjakohinaksi. Dynaamisen alueen suuruuteen vaikuttaa erityisesti

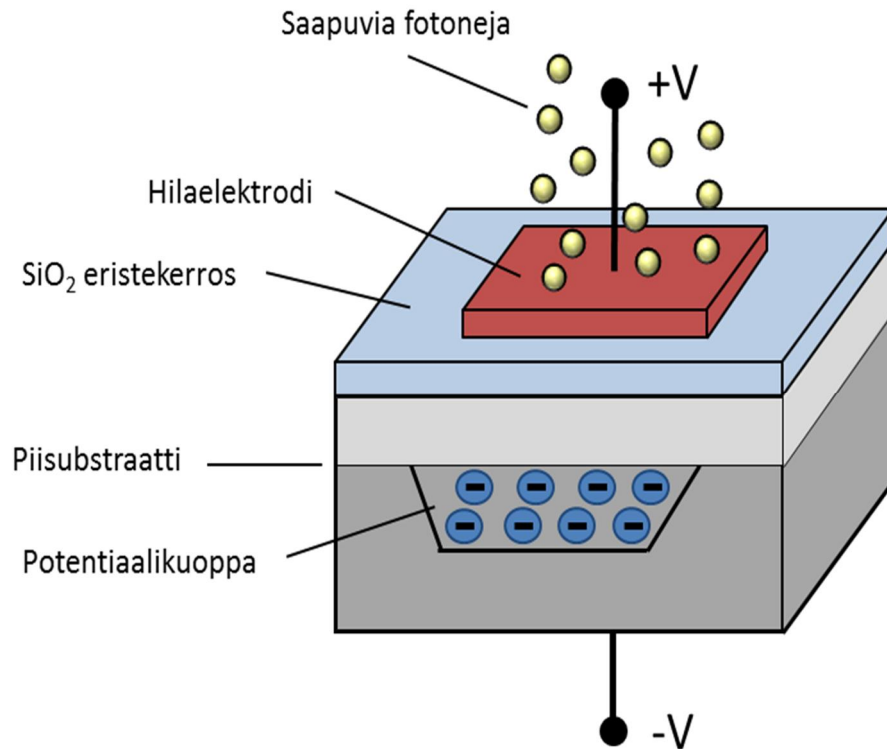
kennon pikselikoko, koska suuremmilla pikseleillä on suurempi maksimivarauskapasiteetti. Käytännössä dynaamisen alueen suuruus ei aivan vastaa yhtälön 3.6 mukaista määritelmää. Tämä johtuu muun muassa siitä, että yksittäisen pikselin saturaatiopisteen lähestyessä kennon signaalivaste alkaa käyttäytyä epälineaarisesti [18]. Eri kennojen välisiä dynaamisen alueen suuruuseroja voidaan joka tapauksessa vertailla yhtälön 3.6 avulla.

Kennon jokainen pikseli kerää tietyn määrän saapuvia fotoneja, jotka pikselissä muunnetaan elektroneiksi. Muodostuvien elektronien lukumäärä pikselissä riippuu siitä, miten paljon valoa (fotoneja) siihen osuu. Elektronien määrät pikseleissä digitalisoidaan A/D-muuntimen avulla. Käytetyn A/D-muuntimen dynamiikka määrittää muodostettavan digitaalisen kuvan bittisyvyyden maksimiarvon. Bittisyvyys kertoo yhtä pikseliä kohti käytettävien bittien lukumäärän [12]. Kennon lukuelektroniikan avulla muodostuvat näin ollen valaistusarvot lopulliseen tuotettuun kuvaan. Esimerkiksi digitalisoinnin bittisyvyyden ollessa 14 bittiä, yksittäinen pikseli pystyy tällöin tallentamaan maksimissaan 16384 erisuuruista harmaasävyarvoa lopulliseen kuvaan, jos kennon dynaamisen alueen suuruus on vähintään yhtä iso. Mitä suurempi kennon dynaamisen alueen suuruus on, sitä enemmän harmaasävyarvoja kameralla pystytään tuottamaan ja sitä tarkemmin värisävyt tuotetussa kuvassa toistuvat. Korkealaatuisten kameroiden valmistuksessa tavoitteena on maksimoida dynaamisen alueen suuruus. Tähän päästään, kun pyritään maksimoimaan kennon maksimivarauskapasiteettia (pikselikokoa) ja minimoimaan kohinaa.

3.6 CCD-kenno

CCD, eli varauskytketty piiri, on vallitseva ja pisimpään käytetty valoherkän kennon valmistustekniikka. CCD on hyvien kohinaominaisuuksiensa ja korkean kvanttihyötysuhteensa vuoksi erittäin laadukas ja hyvin optimoitu kennotekniikka. Nykyaikaiset kehittyneemmät CCD-tyypin kennot soveltuvat vaativaankin kuvantamiseen. CCD-kennon keksivät pohjoisamerikkalaiset fyysikot Willard S. Boyle ja George E. Smith alun perin elektroniseksi muistivälineeksi jo vuonna 1969. Keksinnön nykyisestä merkittävyydestä kertoo fysiikan Nobelin palkinnon myöntäminen CCD:n kehittäjille vuonna 2009 [19].

CCD-kenno on toimintaperiaatteeltaan niin kutsuttu analoginen varauksensiirtorekisteri. Kennon jokaisessa pikselissä ovat MOS-kondensaattorit (*Metal Oxide Semiconductor*) keräävät niihin saapuvat fotonit ja muuntavat ne elektroneiksi. Rakenteeltaan MOS-kondensaattori, eli CCD-kennon yksi pikseli, koostuu kolmesta eri kerroksesta. Rakennekerrokset ovat: metallinen hilaelektrodi, eristekerros ja puolijohtava substraatti [9] [20]. Eristekerros on valmistettu piidioksidista (SiO_2). Puolijohtava substraatti on materiaailtaan seostettua piitä. Seuraavalla sivulla oleva kuva 3.3 havainnollistaa MOS-kondensaattorin rakennekerroksia.

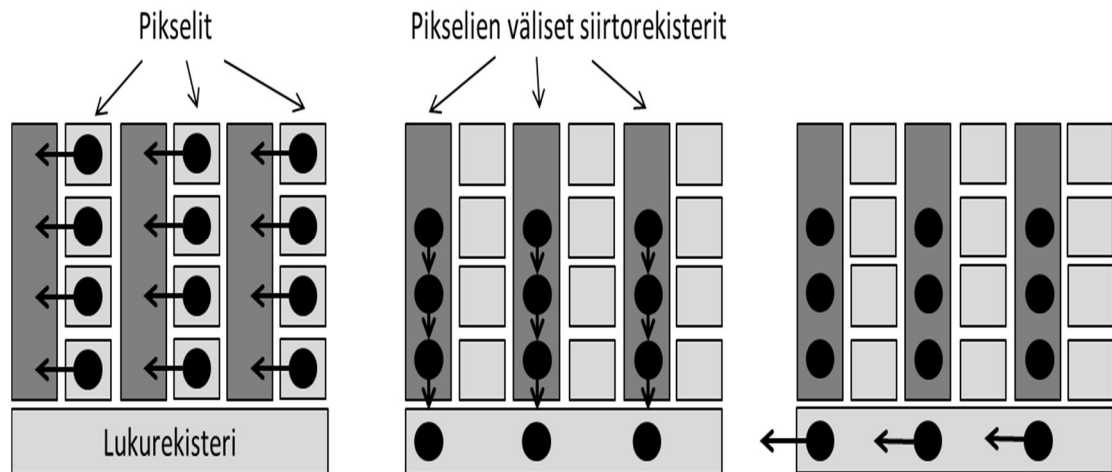


Kuva 3.3 CCD-kennon pikseleissä olevan MOS-kondensaattorin rakenne. Fotoneista muodostuneet elektronit kerääntyvät piisubstraatissa olevaan potentialikuoppaan [18] [20].

MOS-kondensaattorissa oleva piisubstraatti absorboi siihen saapuvia fotoneja, jolloin substraatissa syntyy elektroni-aukko-pareja. Substraatti pystyy absorboimaan fotoneja havaittavasti 300 – 1100 nanometrin aallonpituusalueelta. Absorboiva aallonpituusalue kattaa näkyvän alueen lisäksi siis osan ultraviolett- ja lähi-infrapuna-alueesta. Substraatin kyky absorboida juuri tämän aallonpituusalueen fotoneja perustuu piin optisiin ominaisuuksiin [21].

Absorboinnin jälkeen piisubstraatissa oleva positiivisesti varautunut potentialikuoppa kerää fotonien virittämät vapaasti liikkuvat elektronit talteen. CCD-kennon pikseleihin kerääntyneet elektronit siirretään väliaikaisesti siirtorekisteriin ennen niiden muuntamista digitaaliseen muotoon. Elektronien siirto pikseleiltä siirtorekisteriin tapahtuu ohjaillemalla MOS-kondensaattoreiden hilajännitteitä pikseli pikseliltä [9]. Siirtorekisteristä elektronit luetaan sarjamuotoisesti kennon ulostulovahvistimeen, jossa luettava signaali vahvistetaan. Tämän jälkeen vahvistettu signaali muunnetaan digitaaliseen muotoon käyttämällä A/D-muunninta. Digitalisoinnin lopputuloksena jokainen kennon pikseli saa pikseliin kohdistuneen valaistuksen voimakkuutta kuvaavan harmaasävyarvon. Harmaasävyarvojen perusteella muodostuu siten CCD-kennon tuottama lopullinen digitaalinen kuva.

CCD-kennoja valmistetaan erilaisiin varauksensiirtotapoihin, eli arkkitehtuureihin, perustuen. Yleisimmin käytössä olevat arkkitehtuurit ovat *full frame*, *frame transfer* ja *interline transfer*. Näistä jokaisella arkkitehtuurilla on oma toteutusperiaatteensa, miten pikseleihin varastoituneiden elektronien siirto ennen kennon lukuprosessia suoritetaan. Laajasti käytetty CCD-arkkitehtuuri on *interline transfer*. Sitä käytetään tämänkin työn mittalaitteena käytetyssä kamerassa (alaluku 4.2.1) Se on käytössä yleisesti teollisuuskäyttöisissä suurnopeus- ja konenäkökameroissa sekä useissa CCD-kennoa hyödyntävissä kuluttajakameroissa [12]. *Interline transfer CCD*-arkkitehtuurin (ITCCD) kennoissa jokaisen pikselin viereen on rakennettu valolta suojattu muistialue, joka toimii siirtorekisterinä. Elektronit voidaan siirtää hyvin nopeasti pikseleiltä niiden välisiin siirtorekistereihin. Tämä mahdollistaa erittäin suuren kuvataajuuden, mikä on tärkein etu muihin CCD-arkkitehtuureihin verrattuna [9]. Toinen ITCCD-kennon etu on suttaantumisen (engl. *smear*) eliminointuminen, koska luettavat elektronit ovat siirtorekisterissä valolta suojassa. ITCCD-kennon toimintaperiaatetta selittää tarkemmin kuva 3.4 [22].



Kuva 3.4 Pikselien asettelu ja lukuprosessin toimintaperiaate *interline transfer CCD*-arkkitehtuurissa [22]. Mustat ympyrät kuvaavat elektroneja.

ITCCD-kennon valotusaikaa kontrolloidaan elektronisesti siirtämällä elektronit pikseleiltä nopealla signaalipulssilla valolta suojatulle alueelle. Tällöin valotusajan määrittämiseksi ei tarvita mekaanista suljinta, jolloin kuvia voidaan ottaa lyhyellä valotusajalla. ITCCD-tyypin kennoissa käytetään optimoituja puolijohdeilmaisimia, joiden avulla kennon herkkyys paranee. ITCCD-kennoissa haittapuolena on kuitenkin valoherkän alueen pieni täyttöaste (engl. *fill factor*). Täyttöasteella tarkoitetaan valoherkän alueen osuutta koko kennon pinta-alasta. Se ilmoitetaan prosenttilukuna. ITCCD-kennon täyttöastetta voidaan parantaa sijoittamalla jokaisen pikselin päälle pienen pieni mikrolinssi, joka kerää valoa pienemmälle alalle. Mikrolinssitekniikan avulla yksittäisen pikselin täyttöastetta voidaan ITCCD-tyypin kennoissa parantaa parhaimmillaan yli 75 prosenttiin. Mikrolinssettä käytetäänkin nykyään lähes aina ITCCD-kennoissa, sillä täyttöasteen pienentyessä kennon kokonaiskvanttihyötysuhde heikkenee [12].

3.7 CMOS-kenno

CMOS, eli komplementaarinen metallioksidipuolijohde, on toinen yleinen valoherkän kuvakennon valmistustekniikka. Nykyaikaiset CMOS-kennot tulivat markkinoille 1990-luvun lopulla vaihtoehtoiseksi kennoarkkitehtuuriksi perinteisempien CCD-kennojen rinnalle. CMOS on kehittynyt valmistuskustannuksiltaan edullisemmaksi kennotekniikaksi. Sitä käytetään nykyään varsin yleisesti erityisesti kuluttajamarkkinoille suunnatuissa kompaktikameroissa, järjestelmäkameroissa sekä mobiililaitteisiin integroiduissa kameroissa [12]. Pohjimmiltaan CCD- ja CMOS-kennotekniikat ovat samankaltaisia. Perusperiaate saapuvien fotonien virittämien varausten talteenottotavassa on molemmissa kennotekniikoissa samanlainen. Molempien kennotyyppien toiminta perustuu tunnetusti puolijohdetekniikkaan, jossa piistä valmistetut ilmaisimet mittaavat niihin tulevaa valon määrää. Kennotekniikoilla on kuitenkin muutamia merkittäviä eroavaisuuksia kerätyn varauksen siirtotavassa ja varauksen muuntamisessa digitaaliseen muotoon.

Nykyaikaiset CMOS-kennot ovat rakenteeltaan niin kutsuttuja aktiivipikselikennoja. Aktiivipikselirakenteessa kennolla muodostuneet varaukset muunnetaan jännitteiksi pikselikohtaisesti jokaisessa kennon pikselissä itsessään [12]. Jännitevahvistus suoritetaan myös pikselikohtaisesti. Aktiivipikselirakenteessa varausta ei tarvitse siirtää kennopiirillä minnekään. Toisin kuin CCD-kennossa, CMOS-kennotekniikassa myös A/D-muunnos suoritetaan itse kennopiirillä, jolloin ei tarvita erillistä digitalisointipiiriä. Pikselikohtaiset vahvistimet nopeuttavat signaalin lukuprosessia huomattavasti. Sen ansiosta varaukset voidaan lukea kaikilta CMOS-kennon pikseleiltä samanaikaisesti. Pikselikohtainen varauksenluku mahdollistaa myös vain tiettyjen pikselien tai pikselialueiden luennan. CCD-teknikassa varauksenluku on sen sijaan sarjamuotoista, koska jännitevahvistus ja A/D-muunnos on toteutettu erillisellä piirillä. Tämän vuoksi CCD-kennon lukunopeus on rajoittunutta ja se vaatii enemmän energiaa CMOS-kennon pikselikohtaiseen luentaan verrattuna. Aktiivipikselirakenteen ansiosta CMOS-kenno kuluttaa merkittävästi vähemmän virtaa kuin CCD-kenno. Energiatohokkuuden vuoksi CMOS-kennotekniikka on usein parempi valinta kuluttajatuotteisiin, joissa akunkestoa pidetään tärkeänä ominaisuutena. Myös yksinkertaisempi ja edullisempi valmistusprosessi puoltaa CMOS-kennon valintaa.

CMOS-kenno ei yleensä ole yhtä valoherkkä kuin CCD-kenno, koska aktiivipikselirakenteen vahvistintransistorit vievät pikselin valoherkältä alueelta fyysistä tilaa [9] [12]. CMOS-kennojen täyttöaste kärsii näin ollen pikselikohtaisesti toteutetuista komponenteista. Nykyaikaisella mikrolinssitekniikalla CMOS-kennojen täyttöastetta saadaan kuitenkin jonkin verran kasvatettua. CMOS-kenno on perinteisesti herkempi kohinalle kuin CCD-kenno. Kohinaherkkyys johtuu aktiivipikselirakenteessa olevista kohisevista transistoreista sekä pikselien vahvistimista lähtevien signaalien epätasaisuudesta. Uusimpien CMOS-kennojen yhteydessä käytetään kuitenkin erillistä laskennallista kohinapoisto-ohjelmaa sekä uudenlaisia vahvistimia, jolloin päästään usein yhtä alhaisiin kohinatasoihin kuin CCD-kennoilla. CMOS-kennolle ominaista kohinaa on niin sanottu

kiinteäkuvioinen kohina (engl. *fixed pattern noise*) [9]. Se aiheutuu kennon pikselien vahvistimien erisuuruisista vahvistuksista. Nykypäivänä aina ei ole yksiselitteistä kumpi kennotekniikoista on parempi valinta erityyppisiin kamerasovelluksiin. Molemmat kennotekniikat ovat kehittyneet vuosien saatossa laadultaan niin hyviksi, että CCD- ja CMOS-tekniikat täydentävät monesti toisiaan. Taulukko 1:ssä luetellaan tiivistetysti keskeisimmät erot kennotekniikoiden eri ominaisuuksien välillä.

Taulukko 1. CCD- ja CMOS-kennotekniikoiden keskeisimmät erot [9] [12].

OMINAISUUS	CCD	CMOS
Varauksen muuntaminen jännitteeksi	Kennossa	Pikselissä
Jännitteen vahvistus	Ulkoisella piirillä	Pikselissä
A/D-muunnos	Ulkoisella piirillä	Kennossa
Täyttöaste	Korkeampi	Matalampi
Virran kulutus	Korkeampi	Matalampi
Kennon kompleksisuus	Matalampi	Korkeampi
Valmistuskustannukset	Korkeammat	Matalammat

4. VÄRIKAMERAPYROMETRIA

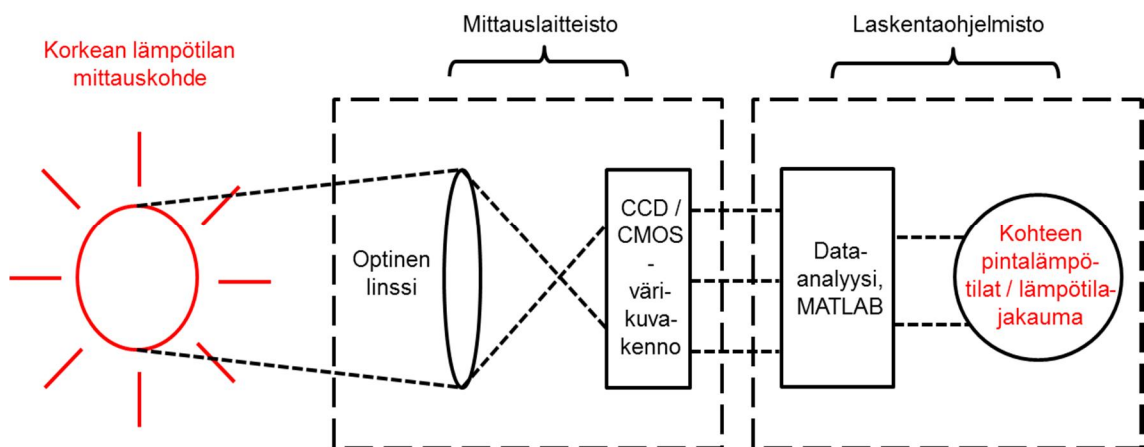
Värikamerapyrometria on korkeiden lämpötilojen optinen mittaustekniikka. Mittalaitteena tekniikassa käytetään digitaalista värikameraa. Optisena ilmaisimena toimii näin ollen kameran kuvakenno. Mittalaitteeksi soveltuu esimerkiksi tavallinen kuluttajakäyttöön tarkoitettu järjestelmäkamera tai tieteelliseen käyttöön tarkoitettu konenäkökamera. Tämän työn mittaussovelluksissa käytettävä värikamerapyrometria perustuu kaksiväripyrometriaan. Perinteiset kuituoptiset pyrometrit perustuvat tavallisesti samoin kaksiväripyrometriaan, mutta niissä optisena ilmaisimena käytetään valodiodia. Kohteen emittoima lämpösäteily johdetaan tällöin ilmaisimelle valokuitua pitkin. Kuituoptiset pyrometrit soveltuvat käytettäväksi muun muassa yksittäisten palavien polttoainehiukkasten, joiden halkaisija on noin 10 – 300 mikrometriä, lämpötilojen mittaamiseen [5]. Tällaista kuituoptista hiukkaspyrometria on kehitetty ja sovellettu erilaisten polttoprosessien tutkimiseen Tampereen teknillisen yliopiston Fysiikan laitoksen Optiikan laboratoriossa vuosien varrella (mm. Paananen [5], Joutsenoja [23], Laurila [24] ja Mikkola [25]).

Kuituoptisella pyrometrilla voidaan selvittää mittauskohteen yksittäisten pisteiden lämpötiloja. Jos halutaan mitata isompia kohteita kuin hiukkasia, niin kuituoptisella pyrometrilla on mahdollista saada selville lisäksi lämpötilajakauma kohteesta pyyhkäisemällä haluttu mittausalue kohteen yli. Tämä on kuitenkin työlästä, eikä lämpötilasta saada tarkkaa tietoa mittauskohteen eri paikoista samalla ajanhetkellä. Lämpötilajakauman tarkka ja reaaliaikainen mittaaminen onnistuu helpommin tässä työssä käytetyllä kuvantavalla pyrometrialla. Kohteen emittoimaa lämpösäteilyä mitataan tällöin suuremmalta alueelta samanaikaisesti ottamalla kohteesta digitaalinen värikuva halutulla ajanhetkellä. Kameran kuvakenno toimii siis menetelmässä eräänlaisena detektorimatriisina, joka koostuu lukuisista valodiodeista (pikseleistä). Värikamerapyrometrian avulla voidaan näin ollen tutkia esimerkiksi erilaisten energiatekniikan polttoprosessien, ja niissä esiintyvien palamisilmiöiden, lämpötilajakaumia.

Tässä luvussa selitetään mihin pyrometrinen lämpötilan määrittäminen digitaalisella värikameralla perustuu. Lisäksi esitellään työn mittaussovelluksissa käytetyt kamerat ja niiden mittausjärjestely. Työssä kehitettiin käytetyille kameroille suunnitellut laskentaohjelmistot. Ohjelmistojen avulla voidaan laskea kuumien mittauskohteiden pintalämpötiloja ja pintalämpötilajakaumia kameroilla otetuista mittauskuvista. Laskentaohjelmistot sekä ohjelmistoilla suoritettava data-analyysi mittauskuville kehitettiin tätä työtä varten MATLAB-ohjelmointikielen avulla. Kehitetyt ohjelmistot ja niiden ohjelmakoodit esitellään tarkemmin alaluvussa 4.4.

4.1 Lämpötilan mittaus värikameralla

Värikamerapyrometriassa taltioidaan kuuman mittauskohteen (yli 400 °C) emittoimaa lämpösäteilyä digitaalisen värikameran kuvakennon avulla. Lämpösäteily jaetaan kuvakennon toiminnan perusteella kolmelle eri valon värikaistalle. Ne ovat kennon Bayer-matriisisuotimen määräämällä tavalla: punainen, vihreä ja sininen. Kamerakennon taltioida digitaalinen kuva tallentuu tällöin RGB-muotoon [9] [13]. Värikaistat kattavat CCD- ja CMOS-kennoille ominaiset näkyvän valon ja lähi-infrapunavalon aallonpituusalueet: noin 300 – 1100 nanometriä. Aallonpituusalue perustuu piikennon optisiin ominaisuuksiin [9]. Mittauskohteen lämpösäteilyn voimakkuutta jokaisella värikaistalla kuvaavat kameralla otettuihin kuviin tallentuvat pikseliarvot (valaistusarvot). Valaistusarvoja voidaan tarkastella ohjelmallisesti digitaalisesta värivalokuvasta. Digitaalisen värivalokuvan pikseliarvojen perusteella voidaan suoraan määrittää mittauskohteen pintalämpötiloja kohteen eri paikoissa, kun kovalle suoritetaan data-analyysi. Kohteen lämpösäteilyn voimakkuutta kuvaavista pikseliarvoista voidaan siten muodostaa lämpötilajakaumia kohteesta jopa pikseli pikseliltä. Kuvan värisävyyn perustuvaa lämpötilan mittaamenetelmää on sovellettu muun muassa lähteiden [13], [26], [27] ja [28] artikkeleissa. Alla oleva kuva 4.1 havainnollistaa värikamerapyrometrian mittaussjärjestelyä [26].



Kuva 4.1 Värikameralla suoritettavan lämpötilamittauksen mittaussjärjestely. Kuva on piirretty käyttäen esimerkkinä lähteessä [26] julkaistua kuvaa.

Käytettävälle värikameralle on olemassa tiettyjä vaatimuksia luotettavien mittaustulosten aikaansaamiseksi. Ensinnäkin mittauksissa käytetyn kameran kuvakennolle ominainen spektrinen RGB-signaalivaste täytyy tuntea [13] [26] [28]. RGB-signaalivaste koostuu kennon jokaisen värikanavan omasta spektrisestä herkkyyysvasteesta. Kennon spektrisellä signaalivasteella tarkoitetaan sitä, miten herkkiä kennon pinnassa olevat pikselit ovat kennolle saapuvan valon eri väreille, eli aallonpituuksille. Signaalivaste ilmoitetaan usein kennovalmistajan teknisessä datalehdessä. Kaupalliset kuluttajakameravalmistajat eivät yleensä kuitenkaan kennojensa signaalivasteita julkaise, joten signaalivaste voidaan joutua tällöin mittaamaan itse sopivan laboratoriolaitteiston avulla.

Työn mittausmenetelmässä mitattavan kohteen pintalämpötiloja määritetään käyttämällä kameran kuvakennon kolmesta värikanavasta kahta kanavaa. Tämä perustuu kaksiväripyrometrian teoriaan, jossa määritelmän mukaan lasketaan kahden värikanavan välistä signaalisuhdetta. Värikamerapyrometriassa signaalisuhde määritetään alla olevalla yhtälöllä 4.1, joka voidaan johtaa kaksiväripyrometrian perusyhtälöstä 2.15:

$$\frac{DN_{kanava1}}{DN_{kanava2}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda_{kanava1}} \cdot \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda_{kanava2}} \cdot \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda} \quad (4.1)$$

Yhtälössä termi DN_{kanava} (*Digital Number*) kuvaa määrätyn värikanavan intensiteettiarvoa (pikseliarvoa) tietyssä pikselissä tai keskiarvotettua pikseliarvoa isommassa pikselijoukossa. Määrätyn värikanavan λ spektristä herkkyysovastetta kuvataan termillä φ_{λ} , jolla yhtälössä kerrotaan teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilytehoa [13] [27]. Yhtälö 4.1 on värikamerapyrometriamenetelmän perusyhtälö. Se määrittää mitatun kahden kanavan välisen signaalisuhteen lämpötilan funktiona. Suhde voidaan siis selvittää laskennallisesti Planckin lain ja värikameran kuvakennon spektristen herkkyysovasteiden (φ_{λ}) perusteella. Kuvakennon jokaista pikseliparia voidaan näin ollen tarkastella yhtenä kaksiväripyrometrina.

Kennon värikanavien valintaan (mitä kahta kanavaa kolmesta käytetään) vaikuttaa käytettyjen kanavien signaalitasojen voimakkuus sekä signaalitasojen keskinäinen riippuvuus. Kahden käytetyn värikanavan herkkyysovasteiden välisen suhteen suuruuden tulisi riippua mahdollisimman voimakkaasti teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilytehon perusteella lasketusta lämpötilasta [13]. Tämä mahdollisimman voimakas lämpötilariippuvuus, eli mahdollisimman hyvä resoluutio, on toisena vaatimuksena käytettävälle värikameralle. Mitä voimakkaampi kanavien vasteiden välisen suhteen suuruuden lämpötilariippuvuus on, sitä parempi on lämpötilamittauksen herkkyys ja tarkkuus. Tätä seikkaa havainnollistavat seuraavassa alaluvussa esitettävät tämän työn kameroiden lämpötilariippuvuuskäyrät (kuvat 4.4 ja 4.8).

4.2 Työn mittalaitteina käytetyt kamerat

Värikamerapyrometrian mittalaitteena käytettiin kahta erilaista digitaalista värikameraa. Työssä käytetyt värikamerat olivat mm. tieteelliseen käyttöön ja konenäköjärjestelmiin soveltuva CCD-suurnopeuskamera *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* sekä pääasiassa kuluttajakäyttöön ja tavalliseen valokuvaukseen tarkoitettu CMOS-järjestelmäkamera *Nikon D5000*. Kyseiset kamerat valittiin siksi, että ne olivat valmiiksi saatavilla tätä työtä varten. Lisäksi työssä tehdyn esiselvityksen perusteella ne olivat sopivia mittalaitteita tämän työn mittaussovelluksiin. Tämä alaluku sisältää esittelyn käytetyistä kameroista, niiden ominaisuuksista sekä niiden soveltuvuudesta värikamerapyrometriaan.

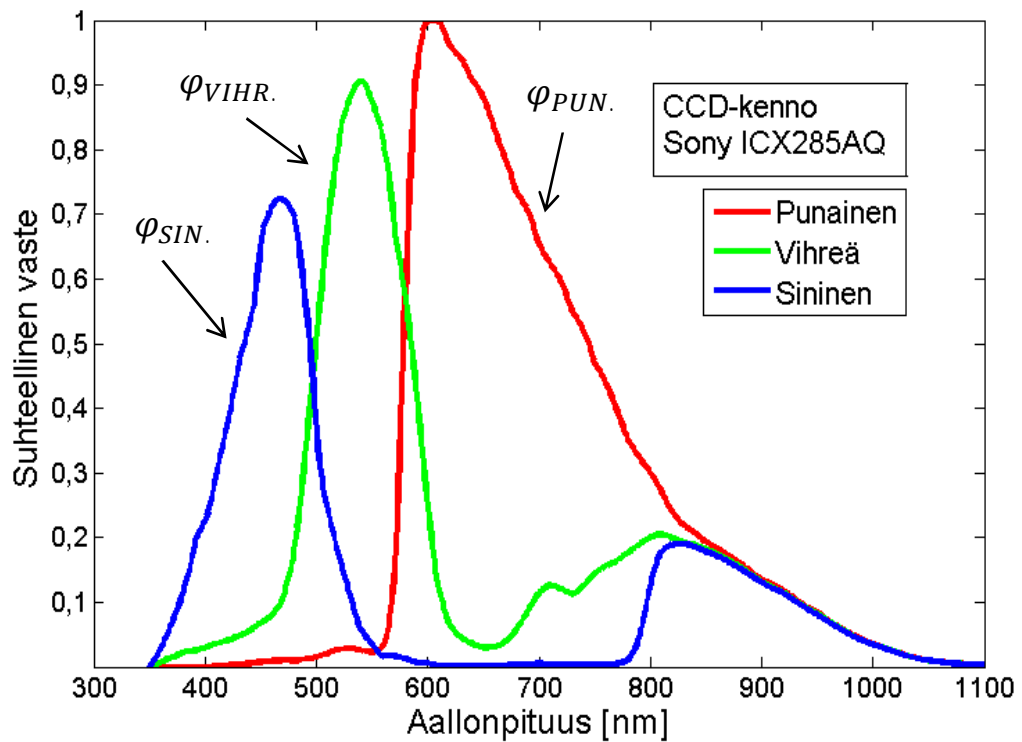
4.2.1 CCD-kamera IMPERX Bobcat

Työn mittaussovelluksissa käytettiin yhtenä mittalaitteena *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikameraa. Kamera on niin sanottu tieteellinen konenäkökamera, joka on suunniteltu pääasiassa suurnopeuskuvausta varten [29]. Sillä voidaan ottaa täydellä resoluutiolla jopa 30 kuvaa sekunnissa. Kamerasta on poistettu kuvakennon edessä tavallisesti sijaitseva infrapunasuodin, jolloin sen avulla voidaan taltioda lämpösäteilyä myös lähi-infrapuna-alueelta (NIR). NIR-alueen aallonpituusalue kuvakennolla on 700 – 1100 nanometriä. Kamera voidaan tilata valmistajalta erikoisversiona suoraan ilman infrapunasuodinta, joten sitä ei tarvitse modifioida itse [30]. Lähi-infrapuna-aallonpituusalueen käyttäminen näkyvän valon aallonpituusalueen lisäksi kasvattaa mitattavissa olevan lämpötila-alueen suuruutta lämpötila-alueen alapäästä. Tämä perustuu Planckin säteilylain mukaiseen säteilyvoimakkuuden lämpötila- ja aallonpituusriippuvuuteen. Toisena etuna lähi-infrapuna-alueen hyödyntämisessä on kameran havaitseman signaalin maksimointi. Kuva 4.2 esittää laitteistokuvan käytetystä CCD-kamerasta [29].



Kuva 4.2 Laitteistokuva värikamerapyrometrian mittalaitteena käytetystä *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* CCD-suurnopeuskamerasta [29].

IMPERX Bobcat -kamerassa on *Sony*n valmistama CCD-kuvakenno, joka on malliltaan *ICX285AQ*. Kenno on arkkitehtuuriltaan *ITCCD (Interline-Transfer CCD)*, ja se käyttää värikuvan muodostamiseen Bayer-matriisisuodinta [30]. Kennon resoluutio on 1392 x 1040 pikseliä (1,4 megapikseliä). Sen optinen formaatti on 2/3 tuumaa. Tämä tarkoittaa, että kennon fyysinen koko on leveydeltään 8,98 millimetriä ja korkeudeltaan 6,71 millimetriä. Kennon yksittäisen pikselin pikselikoko on näin ollen 6,45 mikrometriä. Verrattain suuren pikselikoon ansiosta kennon pikselien maksimivarauskapasiteetti on varsin hyvä. Sitä myöten kennon signaali-kohinasuhde on myös korkea. *Sony ICX285AQ* -kuvakennon tekninen datalehti on ladattavissa verkkolähteestä [31].

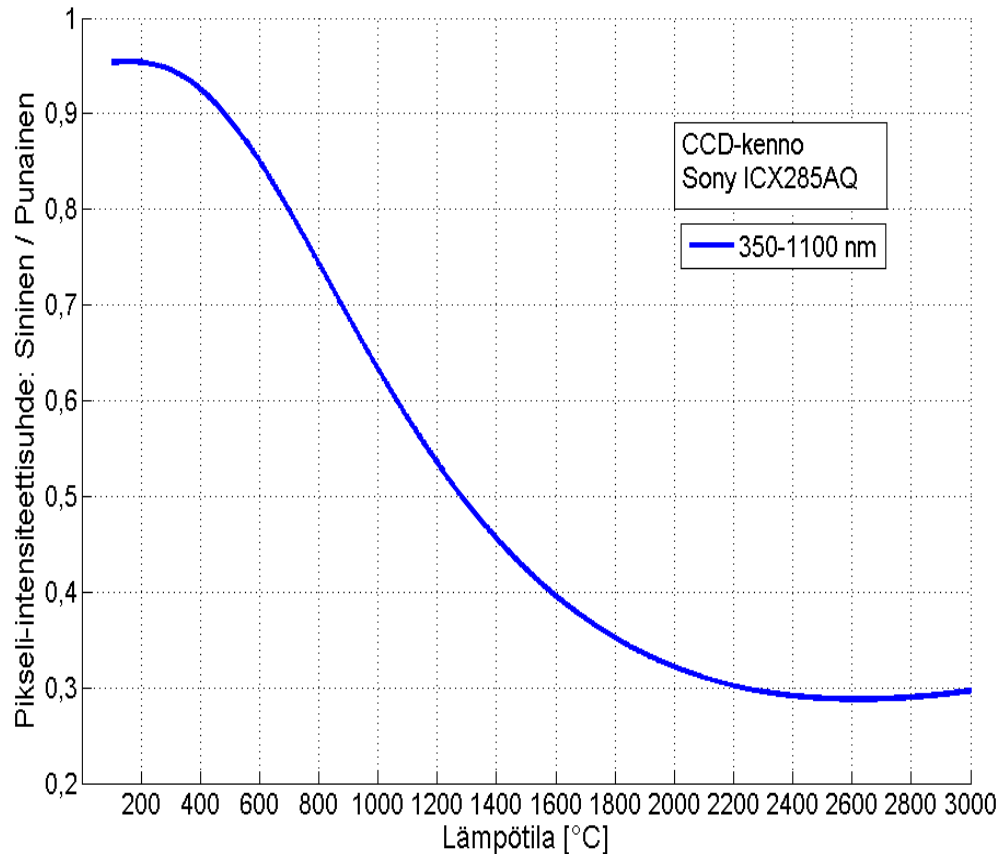


Kuva 4.3 Sony ICX285AQ -kuvakennon R/G/B -värikanavien suhteelliset spektriset herkkyyssvasteet MATLAB-ohjelmistolla piirrettyinä. Spektrivastedatana käytettiin lähteessä [27] mitattua RGB-signaalivastetta kyseiselle kuvakennolle (liite B).

CCD-kameran käyttämän ICX285AQ -kuvakennon värikanavien suhteelliset spektriset herkkyyssvasteet on esitetty yllä olevassa kuvassa 4.3. Kuvan RGB-signaalivaste koostuu kennon punaisen, vihreän ja sinisen värikanavan spektrisistä herkkyyssvasteista $\varphi_{PUN.}$, $\varphi_{VIHR.}$ ja $\varphi_{SIN.}$. Kuvakennon signaalivaste on mitattu lähteen [27] väitöstyössä (liite B). Lähteen mittaustuloksia hyödynnettiin tässä työssä. CCD-värikameran mitta-
usaallonpituus on kennon signaalivasteen mukaisesti 350 – 1100 nanometriä (VIS+NIR). Kuvakennon punaisen värikanavan herkkyyssvasteessa on normaalia suurempi herkkyys lähi-infrapuna-alueella, minkä ansiosta lämpötilamittaukseen saadaan riittävän suuri tarkkuus myös alhaisemilla lämpötiloilla. Kohteen lämpötilan määrittämisessä sovelletaan kaksiväripyrometriaa. Tällöin valitaan kaksi värikanavaa, joita käytetään mittaushkohteen emittoiman lämpösäteilyn voimakkuuden mittaamiseen. Kuvan 4.3 signaalivasteen perusteella kennon sininen ja punainen värikanava erottuvat spektrisesti selvästi toisistaan. Tämän vuoksi käytetylle kameralle ja sen kennolle kaikkein voimakkain signaalisuhteen lämpötilariippuvuus, eli paras resoluutio, saavutetaan käyttämällä sinistä ja punaista värikanavaa [13] [27].

Signaalisuhteen lämpötilariippuvuus voidaan määrittää valittujen värikanavien herkkyyssvasteista. Työssä käytetylle Sonyn CCD-kennolle voimakkain lämpötilariippuvuus ja laajin lämpötilan mitta-alue saavutetaan käyttämällä sinisen värikanavan suhdetta punaiseen värikanavaan [13]. Käytetään siis signaalisuhdetta $\varphi_{SIN.} / \varphi_{PUN.}$. Lämpötila-

riippuvuuden määrittäminen tapahtuu laskemalla värikanavien vasteiden välinen teoreettinen suhde mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille. Tämä suhde laskettiin MATLAB-ohjelmistolla lämpötilavälille 100 – 3000 °C. Laskentamenetelmä ja -koodit esitetään työn alaluvussa 4.4. Lämpötilariippuvuus on piirretty kuvaajana kyseiselle lämpötilavälille alla olevassa kuvassa 4.4. Signaalisuhteen $\varphi_{\text{SIN.}} / \varphi_{\text{PUN.}}$ perusteella voidaan näin ollen määrittää mittaustarkkuuden pintalämpötiloja kohteen eri paikoissa kennon sinisen ja punaisen värikanavan taltioimien pikseliarvojen perusteella.



Kuva 4.4 IMPERX Bobcat IGV-B1410C CCD-värikameran Sony ICX285AQ -kennon sinisen värikanavan vasteen teoreettinen suhde punaisen värikanavan vasteeseen lämpötilan funktiona. Käyrä on piirretty MATLAB-ohjelmistolla kertomalla värikanavien vasteita teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilyteholla eri lämpötiloille. Riittävän hyvän tarkkuuden saamiseksi käytetyllä CCD-värikameralla voidaan mitata lämpötiloja suunnilleen väliltä 400 – 2200 °C, kuten kuvan käyrän jyrkkyydestä voidaan päätellä [13] [27].

IMPERX Bobcat -värikameralla päästään parhaimpaan mittaustarkkuuteen lämpötilavälillä 400 – 2200 °C, koska lämpötilariippuvuuskaivran kulmakertoimen itseisarvo on tällöin riittävän suuri (kuva 4.4). Kameralla voidaan mitata jopa alle 400 °C:een lämpötiloja, mutta tällöin mittaustarkkuus heikkenee oleellisesti, koska lämpötilariippuvuuskaivran kulmakertoimen itseisarvo alkaa pienentyä voimakkaasti. Myös yli 2200 °C:n

kohteiden mittaaminen on mahdollista, mutta tällöinkin mittaustarkkuus heikkenee oleellisesti samasta syystä. Lämpötilan mittausalueen suuruus perustuu siis kuvakennolle ominaiseen spektriseen vasteeseen. Kuvakennon taltioima signaali on mittauskohteen emittoimaa näkyvän aallonpituusalueen ja lähi-infrapuna-alueen lämpösäteilyä (aallonpituusalueeltaan 350 – 1100 nanometriä).

Työn mittauksissa käytettyä CCD-värikameraa ohjataan standardoidun ja konenäkökameran yleisesti käytetyn *GigE vision* -rajapinnan avulla [29]. Käytännössä tämä tapahtuu tietokoneohjelmistolla Ethernet-verkkoyhteyttä käyttäen. Ohjelmistolla voidaan säätää mm. kameran valotusaikaa, kuvataajuutta, kuvan bittisyvyyttä sekä ISO-arvoa. Käytettyä CCD-kameraa ohjattiin kolmannen osapuolen *JAI SDK and Control Tool* -ohjelmistolla [32]. Se on ladattavissa nettilähteestä [32]. Ohjelmiston avulla mittauskohteista otettiin digitaalisia värivalokuvia, jotka tallennettiin RAW-tiedostomuotoon. Tällöin CCD-kameran kuvakennon jokaisen pikselin intensiteettiä saatiin luettua data-analyysia varten helposti MATLAB-ohjelmistoon suoraan raakakuvamuodossa (RAW). Helpompaa kuvien katselua varten mittauskuvat voidaan tallentaa ohjelmistolla suoraan myös esimerkiksi häviöttömään TIFF-tiedostomuotoon.

4.2.2 CMOS-järjestelmäkamera Nikon D5000

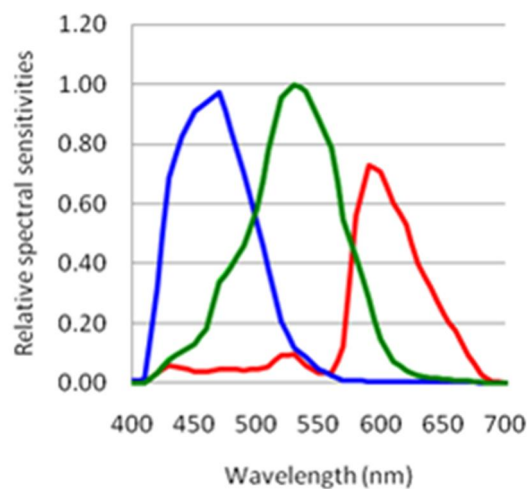
Toisena värikamerapyrometrian mittalaitteena tässä tutkielmassa käytettiin tavallista kuluttajakäyttöön tarkoitettua järjestelmäkameraa. Järjestelmäkamerasta käytetään englanninkielistä termiä *Digital Single-Lens Reflex camera (DSLR)*, eli digitaalinen yksisilmäinen peiliheijastuskamera. Työn mittauksissa käytetty kamera on malliltaan *Nikon D5000*. Kamera on julkaistu vuonna 2009 [33]. Sillä voidaan ottaa maksimissaan neljä kuvaa sekunnissa täydellä resoluutiolla, joten se ei kykene läheskään yhtä isoon kuvataajuuteen kuin työn toinen mittalaite IMPERX Bobcat CCD-kamera. Nikon D5000 -järjestelmäkamerassa on kuvakennon päällä kiinteästi asennettuna infrapunasuodin, kuten DSLR-kameroissa yleensäkin. Tällöin sen mittausaallonpituutena työn mittauksissa käytetään näkyvän valon aallonpituusalueita: 400 – 700 nanometriä. Kamerassa on Sonyn valmistama CMOS-kuvakenno. Kennon resoluutio on 4288 x 2848 pikseliä. Tämä tarkoittaa tehollisina megapikseleinä 12,3 megapikseliä [33]. Kennon fyysinen koko on 23,6 x 15,8 millimetriä (Nikonin DX-formaatti), jolloin yhden pikselin pikselikoko on 5,5 mikrometriä [34]. Seuraavan sivun kuva 4.5 esittää laitteistokuvan käytetystä Nikon D5000 -järjestelmäkamerasta [33].

Nikon D5000 käyttää värikuvan muodostamiseksi Bayer-matriisisuodinta. Värikuva muodostuu kennolla näin ollen samalla periaatteella kuin IMPERX Bobcat CCD-kamerassa. Nikon D5000:ssa on Bayer-matriisisuotimen värielementit järjestetty kuitenkin hieman eri järjestykseen. Värisuodinelementtien järjestäytyminen on oleellista informaatiota lämpötilan laskentaohjelmiston kannalta, jotta tiedetään mitä värikanavaa kukin kennon pikseli edustaa. Suodinelementtien järjestäytyminen työssä käytettyjen kameroiden kennoilla on kuvattu työn alaluvussa 4.4.

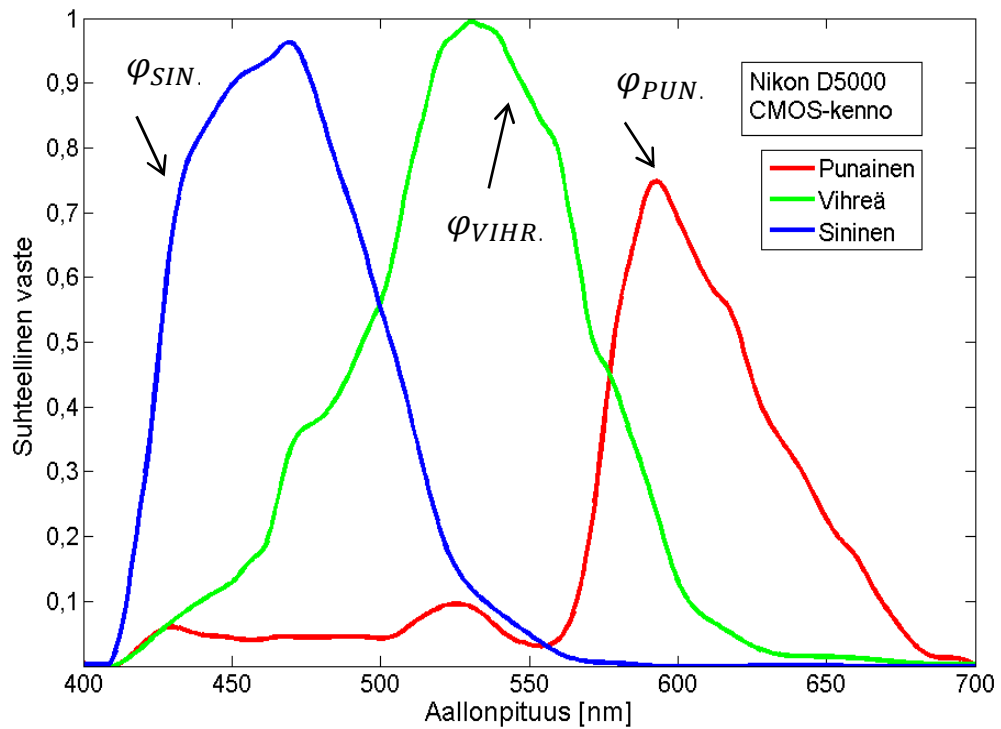


Kuva 4.5 Laitteistokuva tämän työn mittalaitteena käytetystä Nikonin järjestelmäkamerasta [33].

Kuluttajakameravalmistajat eivät yleensä julkaise tarkempia tietoja, kuten RGB-signaaliavastetta, käyttämistään kennoista. Tiedossa on vain kennon valmistaja. Nikon D5000 -kameran kennolle löytyy kuitenkin mitattu spektrinen RGB-signaaliavaste tieteilisiä kameroiden vertailumittauksia tekevän *DxOLabs*:n verkkosivustolta [35]. Tämän verkkosivuston mitaama signaaliavaste esitetään kuvassa 4.6 alla. Työssä todettiin, että työn mittauksissa voidaan käyttää tätä *DxOLabs*:n mitaamaa RGB-signaaliavastetta hyödyksi. Jotta pystytään käyttämään kameraa lämpötilamittaukseen, poimittiin lähteessä [35] olevan kuvan spektridata RGB-signaaliavasteen piirtämistä varten MATLAB-ohjelmistolla (liite C). Kennon spektriset herkkyyssvasteet jokaiselle kennon kolmelle värikanavalle esitetään seuraavan sivun kuvassa 4.7 MATLAB-ohjelmistolla piirrettynä. Kuvan 4.7 piirtämiseksi käytettiin siis hyödyksi lähteen [35] mittausdataa.



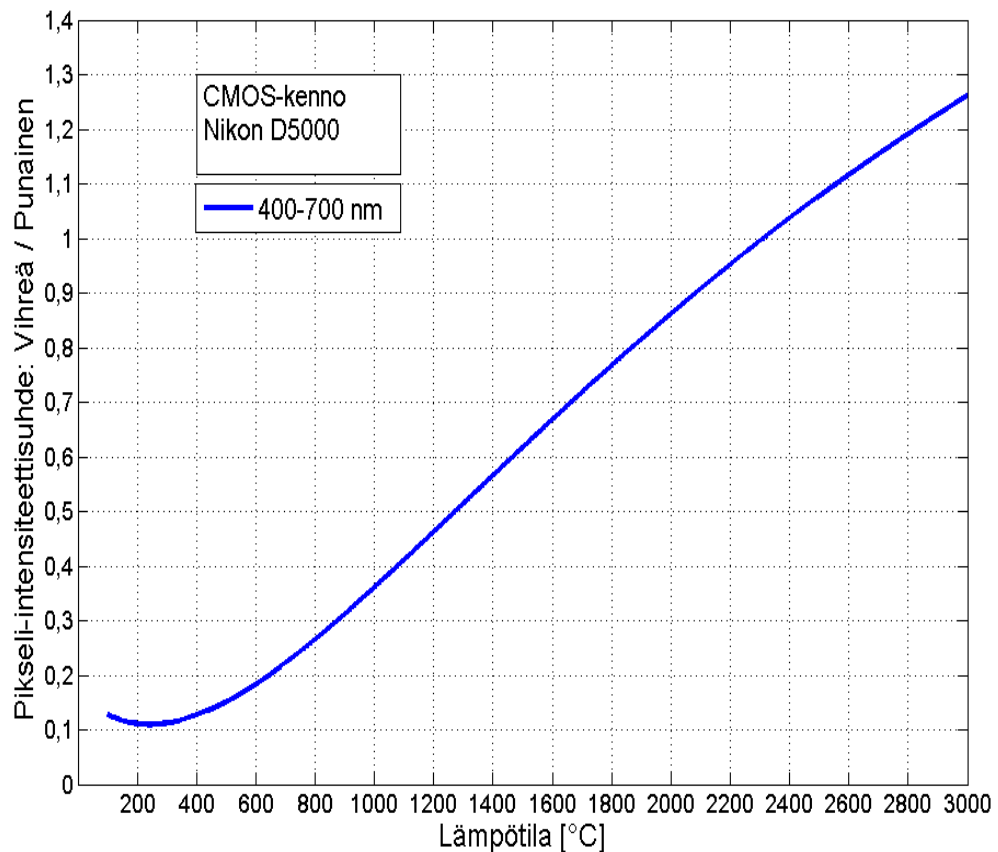
Kuva 4.6 Nikon D5000 -järjestelmäkameran CMOS-kuvakennon R/G/B -värikanavien suhteelliset spektriset herkkyyssvasteet. Kuva on poimittu lähteestä [35].



Kuva 4.7 Nikon D5000 -järjestelmäkameran CMOS-kuvakennon R/G/B -värikanavien suhteelliset spektriset herkkyysoasteet. Vasteet on piirretty MATLAB-ohjelmistolla. Spektridatana käytettiin lähteessä [35] mitattua RGB-signaalivastetta Nikon D5000 -kameralle (liite C).

Järjestelmäkameran kennon signaalivasteesta voidaan havaita, että punainen värikanava ei ole yhtä herkkä kuin IMPERX Bobcat CCD-kamerassa, kun lähestytään infrapuna-aallonpituuksia. Tästä syystä Nikon D5000 -kameralla ei voida mitata värikamerapyrometrialla aivan yhtä alhaisia lämpötiloja kuin työn CCD-kameralla. Kun lasketaan vastaavat eri värikanavien signaalisuhteiden lämpötilariippuvuudet kuin IMPERX Bobcat -kameralle (kuva 4.4), havaitaan että CMOS-järjestelmäkameran kennolle saadaan voimakkain lämpötilariippuvuus (paras resoluutio) käyttämällä kaksiväripyrometrian teorian mukaisesti signaalisuhdetta $\varphi_{VIHR.} / \varphi_{PUN.}$. Vihreän ja punaisen värikanavan signaalitasot ovat riittävän suuret lähestyttäessä lähi-infrapuna-aallonpituusaluetta. Näitä värikanavia käyttämällä saavutetaan myös laajin lämpötilan mitta-alue. Työssä käytettiin siis Nikon D5000:n kennon vihreää ja punaista värikanavaa taltioimaan kuumien mitta-kohteiden emittoimaa lämpösäteilyä.

Lämpötilariippuvuuskäyrä CMOS-järjestelmäkameralle laskettiin samalla periaatteella kuin CCD-kameralle edellisessä alaluvussa 4.2.1. Signaalisuhteen lämpötilariippuvuus värikamerapyrometrian lämpötilamittausta varten laskettiin ja piirrettiin MATLAB-ohjelmistolla. Laskentakoodit esitellään tarkemmin työn alaluvussa 4.4. Nikon D5000:n lämpötilariippuvuuskäyrä käytetylle signaalisuhteelle $\varphi_{VIHR.} / \varphi_{PUN.}$ on esitetty seuraavan sivun kuvassa 4.8 lämpötilavälille 100 – 3000 °C.



Kuva 4.8 Nikon D5000 -järjestelmäkameran CMOS-kuvakennon vihreän värikanavan vasteen teoreettinen suhde punaisen värikanavan vasteeseen lämpötilan funktiona. Lämpötilariippuvuusikäyrä on piirretty MATLAB-ohjelmistolla kertomalla värikanavien vasteita teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilyteholla eri lämpötiloille. Lämpötilan määrittämiseen käytetty pikseli-intensiteettisuhde ”Vihreä / Punainen” saavuttaa arvon yksi lämpötilassa 2313 °C. Kuvasta havaitaan, että riittävän hyvän mittaustarkkuuden saavuttamiseksi Nikon D5000:lla voidaan mitata yli 500 °C:een lämpötiloja.

4.3 Mittausjärjestely

Värikamerapyrometrian mittauksissa täytyy huomioida muutamia mittausteknisiä seikkoja. Olennaisin huomioitava seikka on, että mittauksissa pitää välttää liian voimakasta signaalia kohteesta värikameran kuvakennolle. Muutoin vaarana on kennon värikanavien ja sen seurauksena pikselien saturoituminen. Yksittäinen pikseli saturoituu, kun sen valaistusarvo saa maksimiarvonsa. Jos kennossa olevat pikselit saturoituvat, lämpötilan määrittäminen pikseliarvojen perusteella on mahdotonta. Toisin sanoen mikään kuvakennon värikanava ei saa saturoitua, eli kuva ei saa ylivalottua. Tämän työn mittaussovelluksissa esiintyvissä lämpötiloissa ylivalottuminen tapahtuu Planckin laista johtuen käytännössä ensiksi punaiselle värikanavalle kuumaa mittauskohdetta kuvattaessa. Ylivalottumista voidaan välttää kameral valotusaikaa ja / tai sen optiikan aukkoa muuttamalla.

Kameran kanssa käytettävän objektiivin aukko täytyy kuitenkin pitää riittävän suurena, jotta valo pääsee kulkeutumaan kameras kuvakennolle vapaasti aiheuttamatta diffraktioilmiötä objektiivin aukon reunoista [12].

Diffraktioilmiö tarkoittaa valon taipumista, eli valonsäde ei säilytä tällöin suoraa reittiänsä kulkeutuessaan objektiivin läpi kameras kennolle. Jos mittaushkohteesta tuleva valo pääsee diffraktoitumaan aukon reunoista, tapahtuu valon leviäminen viereisille pikseleille. Tästä aiheutuu huomattavaa epätarkkuutta eri värikanavien pikseliarvoihin, koska valo sekoittuu optisen diffraktioteorian mukaisesti monille erivärisille pikseleille. Tällöin muodostuneessa digitaalisessa väriavokuvassa esiintyy ns. pehmenemistä (engl. *softening*), jolloin yksityiskohdat eivät erotu kuvasta riittävän tarkasti. Se miten pientä aukkoa voidaan objektiivissa käyttää ilman diffraktioilmiön syntymistä, riippuu kuvakennon pikselien koosta ja itse kuvakennon koosta. Nyrkkisääntönä voidaan pitää aukkoarvoa $f/5.6$, jota suuremmilla aukoilla vältetään käytännössä aina ja kamerasta riippumatta diffraktioilmiön syntyminen. Aukon diffraktiorajasta ja diffraktion esiintymisestä digitaalisessa avokuvassa löytyy lisätietoa muun muassa lähteistä [12], [36] ja [37].

Onnistuneessa lämpötilan tai lämpötilajakauan mittaamisessa värikameralla täytyy siis välttää pikselien saturoitumista sekä diffraktioilmiön syntymistä objektiivin aukon reunoista. Mittauksessa täytyy näin ollen käyttää mahdollisimman suurta objektiivin aukkoa mitattavaa kohdetta kuvattaessa. Tällöin vaarana on mittaushkohteen lämpötilan kasvassa pikselien saturoituminen. Kuvattaessa suurella aukolla pikselien saturoituminen voidaan välttää säätämällä kameras valotusaikaa pienemmäksi. Nikon D5000 -kamerassa pienin mahdollinen valotusaika, jota voidaan käyttää, on 1/4000 sekuntia [33]. IMPERX Bobcat CCD-kamerassa vastaava valotusaika on vain 4 mikrosekuntia [30]. Näin pienten valotusajkojen käyttö ei kuitenkaan aina ole kaikissa mittaushsoveluksissa mahdollista. Esimerkkinä tällaisesta sovelluksesta on tämän työn palavien polttoainepartikkelien mittaushsovellus, joka esitellään tarkemmin alaluvussa 5.1. Kameroilla suoritettavassa lämpötilamittauksessa olisi hyvä käyttää pienintä mahdollista värikameras kennon valoherkkyyttä, eli ISO-arvoa. Tällöin digitaalisessa kuvassa esiintyvä mahdollinen kohina saadaan minimoitua. Myös kameras kennon valkotasapainosäädöt täytyy pitää kaikille värikanaville samassa nollassa, jotta mikään värikanava ei vahvistu/heikkene, mikä sotkisi lämpötilamittauksen tarkkuuden.

Jos valotusaika on pidettävä mittaushsovelluksen mittausteknisten seikkojen vuoksi niin pitkänä, että kennon pikselit saturoituvat kuumaa kohdetta kuvattaessa, voidaan käyttää erityistä harmaasuodinta kameras objektiivin edessä. Harmaasuodin (engl. *neutral density filter*) vaimentaa mittaushkohteesta tulevaa valoa siten, että kameras kennolle saapuvan valon voimakkuus on vaimentunut tasaisesti joka aallonpituudelta. Harmaasuotimia (ND-suotimia) on saatavilla eri vaimennusvoimakkuuksilla. Jos harmaasuotimen vaimennusvoimakkuus on riittävän suuri kuvattaessa kuumaa mittaushkohdetta pidemmällä

valotusajalla ja mahdollisimman suurella aukolla, niin pikselit eivät saturoidu eikä kuva pääse tällöin ylivalottumaan.

Kameraobjektiivit

Työn IMPERX Bobcat CCD-kameran kanssa voidaan käyttää objektiivina esimerkiksi *Computarin* objektiivia malliltaan *TEC-M55* [38]. Työn mittaussovelluksissa käytettiin tätä kiinteän polttovälin telesentristä objektiivia. Objektiivin ominaisuudet ja tekninen datalehti löytyvät *Computarin* verkkosivuilta [38]. Tähän käytettyyn kameraobjektiivi-yhdistelmään (*C-mount* kierrekiinnitys) on saatavilla harmaasuotimia eri vaimennusvoimakkuuksilla esimerkiksi *Thorlabs Inc.*:n tuotevalikoimasta ("*Ø25 mm Mounted Reflective ND Filters*") [39]. Vaimennusvoimakkuudeltaan $OD = 1.3$ (engl. *Optical Density*) oleva harmaasuodin päästää esimerkiksi lävitseen vain noin 5 prosenttia mittaushetken tulevista säteilystä. *Thorlabs* -harmaasuotimet voidaan asettaa sovitarenkaiden avulla käytetyn CCD-kameran ja objektiivin väliin. Niitä voidaan myös yhdistellä sarjaan, jotta saadaan haluttu vaimennusvoimakkuus käyttöön. Harmaasuotimien vaimennusvoimakkuudet eri valon aallonpituuksilla täytyy olla tiedossa, jotta mittaushetken lämpötiloja voidaan laskea tarkasti. *Thorlabs* -harmaasuotimien vaimennusvoimakkuuksien spektridatat ovat löydettävissä lämpötilan laskentamenetelmää varten lähteestä [39]

Kameroille ominaiset lämpötilariippuvuuskäyrät (kuvat 4.4 ja 4.8) muuttuvat aina hiukan, jos mittauksissa käytetään eri harmaasuotimia. Muutos johtuu siitä, että käytetyt harmaasuotimet eivät vaimenna valon voimakkuutta aivan tasaisesti joka aallonpituudelta. Tämä täytyy siis ottaa huomioon, kun lasketaan lämpötilariippuvuuskäyriä käytettäessä harmaasuodinta. Käytännössä laskenta tapahtuu siten, että harmaasuotimien vaimennusvoimakkuuksien spektridatoilla kerrotaan käytetyn kameran kennon värikanavien spektrisiä herkkyysevasteita (laskentakoodit esitetään alaluvussa 4.4).

Kun käytetään Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameraa lämpötilamittaukseen, on suositeltavaa käyttää sen kanssa mahdollisimman valovoimaista objektiivia. Tällainen on esimerkiksi Nikonin oma kiinteän polttovälin objektiivi malliltaan *Nikkor AF-S DX 35mm f/1.8G* [40]. Kyseistä objektiivia käytettiin tämän työn mittauksissa yhdessä Nikon D5000:n kamerarungon kanssa.

CMOS-järjestelmäkameralla suoritettavissa mittauksissa olisi suositeltavaa käyttää erityistä ultraviolett- ja infrapunavalon blokkaukseen tarkoitettua suodinta. Vaikka järjestelmäkamerassa on kuvakennon päällä kiinteästi tehdasasennettuna infrapunasuodin, niin se saattaa siitä huolimatta päästää aina hieman häiritsevää lähi-infrapunasäteilyä kennolle infrapunasuotimen epäideaalisuuden vuoksi. Tämä voi sotkea lämpötilamittauksen tarkkuutta jonkin verran. Tämän työn mittauksissa kyseistä suodinta ei kuitenkaan ollut mahdollista käyttää. Niin sanottua "*UV/IR Cut-Off*" -suodinta käytettäessä voidaan varmistua siitä, että lämpötilan laskentaan käytetty CMOS-kuvakennon spekt-

rivaste vastaa tällöin todellisuutta (näkyvä aallonpituusalue 400 – 700 nm). ”UV/IR Cut-Off” -suodin päästää siis kennolle vain näkyvän valon aallonpituuksia. Ultravioletti- ja infrapunavalon blokkaukseen tarkoitettu suodin voidaan asettaa Nikon D5000:n objektiivin eteen suodinkierteeseen 52mm. Esimerkkinä tällaisesta suotimesta on *Edmund Optics Inc.*:n tuotevalikoimasta löytyvä ”UV/IR Cut-Off Filter” [41]. Suotimen läpäisykyvylle eri aallonpituuksilla on saatavissa spektridata valmistajan verkkosivustolta [41]. Jos lämpötilamittauksessa käytetään Nikon D5000:n kanssa kyseistä ”UV/IR Cut-Off” -suodinta, niin sen läpäisykyvyn spektridata täytyy ottaa huomioon lämpötilan laskennassa samalla tavalla kuin IMPERX Bobcat CCD-kamerassa harmaasuodinta käytettäessä. Tällöin ”UV/IR Cut-Off” -suotimen läpäisykyvyn spektridatalla kerrotaan Nikon D5000:n kennon värikanavien spektrisiä herkkyyssvasteita (kuva 4.7). Tämän seurauksena kennolle ominainen lämpötilariippuvuuskäyrä (kuva 4.8) signaalisuhteelle $\varphi_{VIHR.} / \varphi_{PUN.}$ muuttuu hieman. Kuva 4.8 on siis piirretty ottamatta huomioon ultravioletti- ja infrapunavalon blokkaukseen tarkoitettua suodinta, koska suodinta ei tämän työn mittaussovelluksissa käytetty.

Tiivistetysti kerrottuna värikameran ominaisuudet määräävät maksimi- ja minimilämpötilat, joita värikamerapyrometrialla voidaan mitata. Mittausjärjestelyn määrääviä ominaisuuksia ovat kennon herkkyys, valotusajan säätöväli, kohinataso sekä käytettävän kameraobjektiivin valovoimaisuus. Pienin lämpötila saavutetaan silloin, kun edes maksimivalotusajalla ei saada kerättyä riittävän suurta signaalia lämpötilan selvittämiseksi. Suurin mitattava lämpötila saavutetaan puolestaan silloin, kun mitattava kohde muuttuu niin kirkkaaksi, että mittauskuva ylivalottuu lyhyemmälläkin valotusajalla.

4.4 Laskentamenetelmä

Tässä alaluvussa selitetään työssä kehitetyn laskentaohjelmiston toiminta sekä esitetään ohjelmiston ohjelmakoodit työn mittauksissa käytetyille kameroille. Ohjelmakoodien avulla voidaan laskea mittauskohteiden pinta- $\varphi_{VIHR.}$ lämpötiloja ja lämpötilajakaumia kameroilla otettujen mittauskuvien pikseliarvojen perusteella. Data-analyysi mittauskuville sekä lämpötilojen laskenta suoritetaan MATLAB-ohjelmistolla. Tässä alaluvussa esitetään myös kuvakennon Bayer-matriisisuotimen värielementtien järjestäytyminen työssä käytetyissä IMPERX Bobcat CCD-kamerassa ja Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkamerassa. Värielementtien järjestäytyminen on olennaista tietoa ohjelmistolla suoritettavassa lämpötilan laskennassa.

Värikamerapyrometrian laskentamenetelmässä lasketaan ensin käytetyille värikameroille ominaiset lämpötilariippuvuuskäyrät ottamalla huomioon kamerasuotimen kanssa mittauksissa mahdollisesti käytetyt harmaa- tai muut suotimet. Lämpötilariippuvuuskäyrien perusteella voidaan sen jälkeen laskea kuumien mittauskohteiden pinta- $\varphi_{VIHR.}$ lämpötiloja ja lämpötilajakaumia työssä kehitettyjen laskentakoodien avulla.

Mittauskuvan lukeminen laskentaohjelmistoon

Mittauskohteesta otetut mittauskuvat tallentuvat kamerassa kuvatiedostoiksi, jotka täytyy aina ensin lukea laskentaohjelmistoon sen ymmärtämässä muodossa. Lukemisen jälkeen kuvatiedostoille voidaan suorittaa data-analyysi lämpötilojen määrittämiseksi. Menetelmän mittauskuvat tallennetaan aina käytetystä värikamerasta riippumatta raakakuvamuodossa. Tällöin kamera tallentaa kuvainformaation kohteesta pakkaamattomana suoraan kuvakennolta. IMPERX Bobcat CCD-kamerassa raakakuvat tallennetaan RAW-tiedostomuodossa, jonka MATLAB-ohjelmisto pystyy lukemaan ongelmitta. CCD-kameran kuvausasetuksissa on suositeltavaa käyttää suurinta mahdollista kennon dynaamisen alueen rajoittamaa bittisyvyyttä. Suurella bittisyvyydellä saadaan mittauskuvaan tallennettua mahdollisimman paljon valaistusarvoja, mikä parantaa lämpötilamittauksen tarkkuutta. Työn CCD-kameramittauksissa käytettiin 12-bittistä bittisyvyyttä, jolloin digitaalisten värikuvien kaikki pikselit saavat harmaasävyarvoja (valaistusarvoja) väliltä 0 – 4095. Kuvaresoluutiona IMPERX Bobcat värikamerassa on 1392 x 1040 pikseliä. Alla esitelty Ohjelma 1 lukee CCD-kameralla otetun RAW-mittauskuvan MATLAB-ohjelmistoon edellä luetelluilla asetusarvoilla.

```
function [image_data]=lue_kuva(kansio,image_name);  
% Funktio lukee RAW-kuvan datakansioista 'kansio' matriisiin 'image_data'.  
% Lopuksi funktio piirtää kuvan.  
  
%% Luetaan kuva datakansioista ja siirretään se työhakemistoon  
source=[kansio '\',image_name];  
destination=[pwd '\',image_name];  
copyfile(source,destination)  
fid=fopen(image_name);  
image_data=fread(fid,[1392 1040],'uint16');  
image_data=image_data';  
fclose(fid);  
clear fid  
  
%% Piirretään kuva ja poistetaan kuvatiedosto työhakemistosta  
figure; imagesc(image_data)  
delete([image_name])  
end
```

Ohjelma 1. MATLAB-funktio *lue_kuva.m*: CCD-kameralla otetun RAW-mittauskuvan lukeminen MATLABiin sekä sen piirtäminen (resoluutio 1392 x 1040 pikseliä, 12bit).

Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkamerassa häviöttömät raakakuvat tallentuvat NEF-tiedostomuotoon. NEF-tiedostomuoto on Nikonin kehittämä ja yksinomaan sen kameroissa käytetty raakakuvatiedostomuoto. NEF-kuvatiedoston lukeminen MATLAB-ohjelmistoon on hieman ongelmallisempaa kuin tavallisen RAW-tiedoston. NEF-kuvatiedostot täytyy aina ensin muuntaa DNG-tiedostomuotoon (*Digital Negative*), jotta niiden lukeminen MATLAB:in ymmärtämään muotoon on mahdollista. DNG-tiedostomuoto on Adobe:n kehittämä standardinomainen ja valmistajariippumaton raa-

kakuvien tallennusmuoto. Nikonin NEF-raakakuvien lukeminen MATLAB-ohjelmistoon on esitetty seikkaperäisesti *MathWorks Inc.*:n verkkosivulla lähteessä [42].

NEF-tiedoston muuntaminen DNG-tiedostoksi suoritetaan *Adobe DNG converter* -ohjelmistolla. Ohjelmisto on ladattavissa ilmaiseksi verkkolähteestä [43]. *DNG converter* -ohjelmisto tallennetaan MATLAB:in työhakemistoon nimellä *DNG.exe*, jotta mitauskuvan lukeminen alla esitetyn MATLAB-funktion *lue_kuva_nikon.m* avulla onnistuu. Ohjelma 2 sisältää MATLAB-funktion NEF-kuvatiedoston lukemiseen.

```
function [image_data, curve, kanta]=lue_kuva_nikon(kansio, image_name);
% Funktio lukee NEF-raakakuvan datakansioista 'kansio' matriisiin
% 'image_data'. Kuvalle suoritetaan ensin DNG-muunnos. Lopuksi piirretään
% kuva. Esimerkki syöte:
% [image_data, curve, kanta]=lue_kuva_nikon('data', 'kuva.NEF');

%% Luetaan kuva datakansioista ja siirretään se työhakemistoon
source=[kansio '\', image_name];
destination=[pwd '\', image_name];
copyfile(source, destination)

%% Suoritetaan DNG-muunnos. Työhakemistossa oltava DNG.exe-ohjelma
eval(['!DNG.exe -u -p1 -dng1.3 ' image_name ''])

%% Luetaan DNG-kuva
image_name_cell=textscan(image_name, '%s %s', 'delimiter', '.');
image_name2=char(image_name_cell{1});
dng='.dng';
image_name3=strcat(image_name2, dng);
warning off
warning off MATLAB: tifflib: TIFFReadDirectory: libraryWarning
t = Tiff(image_name3, 'r');
offsets = getTag(t, 'SubIFDs');
setSubDirectory(t, offsets(1));
cfa = read(t);
close(t);

%% Linearisoidaan DNG-kuva
info = imfinfo(image_name3);
kanta=0:771;
curve = info.SubIFDs{1}.LinearizationTable;
image_data=zeros(size(cfa));
for jj=0:771
    a=find(cfa==jj);
    image_data(a)=curve(jj+1);
end

%% Piirretään kuva. Poistetaan kuvatiedosto ja DNG-tiedosto työhakemistosta
figure; imagesc(image_data)
delete([image_name])
delete([image_name3])
end
```

Ohjelma 2. Funktio *lue_kuva_nikon.m*: NEF-mittauskuvan lukeminen MATLABiin sekä sen piirtäminen (resoluutio 4310 x 2868 pikseliä, 12bit). Funktion kanssa samassa hakemistossa on oltava tallennettuna *Adobe DNG converter* -ohjelmisto nimellä *DNG.exe*. [42] [43]

Bayer-matriisisuotimen värielementtien järjestäytyminen kamerakennoilla

Värikameran kuvakennon Bayer-matriisisuotimen värielementit on järjestetty eri järjestykseen eri kameroiden kennoilla. Alla esitetään värielementtien järjestäytyminen työn mittalaitteena käytetyissä kameroissa. Ohjelma 3 sisältää informaation värielementtien järjestäytymiselle IMPERX Bobcat IGV-B1410C CCD-värikamerassa. Ohjelma 4 esittää saman informaation Nikon D5000 -järjestelmäkameralle.

MATLAB-datatieedosto `Bayer_imperx.mat` sisältää informaation värielementtien järjestäytymisestä kameras kuvakennolla. Datatieedosto sisältää loogiset (arvo 0 tai 1) matriisit (koko 1040x1392) `B_B`, `B_G` ja `B_R`. Arvo 1 tarkoittaa, että siinä pikselissä on kyseisen värinen värielementti. Arvo 0 tarkoittaa, että siinä pikselissä ei ole. Matriisit on kuvattu 4x4 osamatriiseina alla. Osamatriisit toistuvat samanlaisina koko kennon alalle (1040x1392).

`B_B` (sininen):

0	0	0	0
0	1	0	1
0	0	0	0
0	1	0	1

`B_R` (punainen):

1	0	1	0
0	0	0	0
1	0	1	0
0	0	0	0

`B_G` (vihreä):

0	1	0	1
1	0	1	0
0	1	0	1
1	0	1	0

Ohjelma 3. Datatieedosto ***Bayer_imperx.mat***: Bayer-matriisisuotimen värielementtien järjestäytyminen IMPERX Bobcat IGV-B1410C CCD-värikamerassa.

MATLAB-datatieedosto `Bayer_nikon.mat` sisältää informaation värielementtien järjestäytymisestä kameras kuvakennolla. Datatieedosto sisältää loogiset (arvo 0 tai 1) matriisit (koko 2868x4310) `B_B`, `B_G` ja `B_R`. Matriisit on kuvattu 4x4 osamatriiseina alla. Osamatriisit toistuvat samanlaisina koko kennon alalle (2868x4310).

`B_B` (sininen):

0	1	0	1
0	0	0	0
0	1	0	1
0	0	0	0

`B_R` (punainen):

0	0	0	0
1	0	1	0
0	0	0	0
1	0	1	0

`B_G` (vihreä):

1	0	1	0
0	1	0	1
1	0	1	0
0	1	0	1

Ohjelma 4. Datatieedosto ***Bayer_nikon.mat***: Bayer-matriisisuotimen värielementtien järjestäytyminen Nikon D5000 -järjestelmäkamerassa.

Lämpötilariippuvuuskyörien laskenta

Värikamerapyrometrian mittauksissa käytettävän värikameran kuvakennon kaikille värikanaville täytyy olla tiedossa niiden spektriset signaalivasteet, jotta mittauskohteen lämpötilojen määrittäminen digitaalisesta väriavokuvasta onnistuu. Kennon värikanavien

spektristen signaalivasteiden perusteella lasketaan kennoille ominaiset lämpötilariippuvuuskäyrät. Lämpötilariippuvuuskäyrä kuvaa kahden halutun värikanavan signaalivasteen suhteen (pikseli-intensiteettisuhde) suuruuden lämpötilan funktiona. Lämpötilariippuvuuden määrittäminen tapahtuu siten, että värikanavien vasteita kerrotaan teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilyteholla eri lämpötiloille. Jos mittauksissa käytettävän värikameran kanssa käytetään jotain suodinta, niin sen läpäisevyyden spektridata täytyy ottaa huomioon lämpötilariippuvuuskäyrää laskettaessa. Ohjelma 5 esittää MATLAB-laskentakoodin teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilytehon laskemiseksi eri lämpötiloille.

```
function [I_lambda,B]=sateilija(I_lampotila_C);
% Funktio muodostaa Planckin säteilylain mukaisen mustan kappaleen
% säteilytehon periaallonpituus aallonpituuden funktiona välillä
% 300 - 50000 nm 1 nm välein.

%% Vakioiden määrittely
I_lambda=(300:1:50000)*1e-9;
h=6.6260693e-34; %Js
c=2.99792458e8; %m/s
k=1.3806505e-23; %J/K
C1=2*pi*h*c^2; C2=h*c/k;

%% Säteilytehon laskenta
T=I_lampotila_C+273.15;
B=C1./I_lambda.^5*1./(exp(C2./(I_lambda*T))-1)*1e-9;
end
```

Ohjelma 5. MATLAB-funktio *sateilija.m*: Teoreettisen mustan kappaleen säteilijän säteilytehon laskenta.

IMPERX Bobcat IGV-B1410C -kameran Sony ICX285AQ -kuvakennon värikanavien vasteiden teoreettiset suhteet mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille lasketaan seuraavalla sivulla esitetyssä MATLAB-funktiossa *kanavien_suhde_sony_ND13.m* (Ohjelma 6). Kennon värikanavien spektrivasteet tallennetaan funktiossa datatiedostoon *SPL_sony_vaste.mat*. Jos kameran kanssa käytetään jotain harmaasuodinta, niin sen läpäisevyyden spektridata täytyy ottaa laskennassa huomioon. Ohjelma 6:n funktiossa on käytetty esimerkin vuoksi Thorlabsin harmaasuodinta ND13A, jonka vaimennuksen aallonpituusriippuvuus tallennetaan datatiedostoon *SPL_ND_13.mat*. Kuten aikaisemmin todettiin, IMPERX Bobcat CCD-kamerassa käytetään lämpötilan laskemiseksi signaalisuhdetta $\varphi_{SIN} / \varphi_{PUN}$. Ohjelma 6 tallentaa käytetyn signaalisuhteen vektoriin *B_R_suhde*.

Seuraavalla sivulla kuvatussa funktiossa *kanavien_suhde_nikon.m* (Ohjelma 7) lasketaan vastaavasti Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameran kuvakennon värikanavien vasteiden teoreettiset suhteet mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille. Kennon värikanavien spektrivasteet tallennetaan datatiedostoon *D5000_vaste.mat* (liite C). Nikon D5000 -kameralle käytetään lämpötilan laskemiseksi signaalisuhdetta $\varphi_{VIHR} / \varphi_{PUN}$. Ohjelma 7 tallentaa käytetyn signaalisuhteen vektoriin *G_R_suhde*. Ohjelma 5:n funk-

tiota *sateilija.m* käytetään määrittettäessä värikanavien suhteita Ohjelma 6:ssa ja Ohjelma 7:ssa. Ohjelma 5 täytyy näin ollen sijaita samassa työhakemistossa Ohjelma 6:n ja Ohjelma 7:n kanssa.

```
function [G_R_suhde, B_R_suhde, B_G_suhde]=kanavi en_suhde_sony_ND13(T_C);
% Funktio laskee kameran värikanavien vasteiden teoreettisen
% suhteen mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille.

%% Luetaan kameravaste ja harmaasuotimen vaimennusvaste
load SPL_sony_vaste.mat
load SPL_ND_13.mat
ND_R=ND_tr_13.*RGB_vaste(1,:); % ND_tr_13:ssa sijaitsee vaimennusvaste
ND_G=ND_tr_13.*RGB_vaste(2,:);
ND_B=ND_tr_13.*RGB_vaste(3,:);

%% Lasketaan värikanavien suhteet eri lämpötiloissa
P_G_suhde=zeros(1,length(T_C));
for jj=1:length(T_C)
    [lambda, B]=sateilija(T_C(jj));
    B_vaste=spline(lambda, B, kamerakanta*1e-9);
    arvo_pun=sum(ND_R.*B_vaste)*diff(kamerakanta(1:2));
    arvo_vih=sum(ND_G.*B_vaste)*diff(kamerakanta(1:2));
    arvo_sin=sum(ND_B.*B_vaste)*diff(kamerakanta(1:2));
    G_R_suhde(jj)=arvo_vih/arvo_pun;
    B_R_suhde(jj)=arvo_sin/arvo_pun;
    B_G_suhde(jj)=arvo_sin/arvo_vih;
end
end
```

Ohjelma 6. MATLAB-funktio *kanavien_suhde_sony_ND13.m*: Funktio laskee IMPERX Bobcat CCD-kameran värikanavien vasteiden teoreettisen suhteen mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille, kun käytetään Thorlabsin harmaasuodinta ND13A.

```
function [G_R_suhde, B_R_suhde, B_G_suhde]=kanavi en_suhde_nikon(T_C);
% Funktio laskee kameran värikanavien vasteiden teoreettisen
% suhteen mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille.

%% Luetaan kameravaste
load D5000_vaste.mat

%% Lasketaan värikanavien suhteet eri lämpötiloissa
P_G_suhde=zeros(1,length(T_C));
for jj=1:length(T_C)
    [lambda, B]=sateilija(T_C(jj));
    B_vaste=spline(lambda, B, kanta2*1e-9);
    arvo_pun=sum( RGB_vaste(1,:). *B_vaste)*diff(kanta2(1:2));
    arvo_vih=sum( RGB_vaste(2,:). *B_vaste)*diff(kanta2(1:2));
    arvo_sin=sum( RGB_vaste(3,:). *B_vaste)*diff(kanta2(1:2));
    G_R_suhde(jj)=arvo_vih/arvo_pun;
    B_R_suhde(jj)=arvo_sin/arvo_pun;
    B_G_suhde(jj)=arvo_sin/arvo_vih;
end
end
```

Ohjelma 7. MATLAB-funktio *kanavien_suhde_nikon.m*: Funktio laskee Nikon D5000-järjestelmäkameran värikanavien vasteiden teoreettisen suhteen mustan kappaleen säteilijän eri lämpötiloille.

Mittauskohteen pintalämpötilojen laskenta

Kuuman mittauskohteen pintalämpötiloja kohteen eri osissa pystytään laskemaan värikameralla otetun digikuvan pikseliarvojen perusteella, kun tiedetään kuvakennolle ominaiset ja edellä lasketut lämpötilariippuvuuskäyrät (kuvat 4.4 ja 4.8). Mittauskohteen lämpötiloja määritettäessä täytyy laskennassa aina kulloinkin käyttää sitä lämpötilariippuvuuskäyriä, joka on ominainen käytetylle mittausjärjestelylle (kuvakennon tyyppi ja mahdollisesti kameran kanssa käytetyn suotimen tyyppi). Ohjelma 8:ssa on esitetty työssä kehitetty MATLAB-funktio *laske_lampo_imperx.m*, jossa lasketaan IMPERX Bobcat CCD-kameralla otetusta RAW-mittauskuvasta kohteen pintalämpötila halutun suuruisesta osasta mittauskuvaa. Ohjelma 8:n funktio laskee halutusta osasta mittauskuvaa pikseliarvojen keskiarvot, joiden perusteella lasketaan kyseisessä kuvan osassa esiintyvä kohteen pintalämpötila kuvanottohetkellä. Lämpötilat lasketaan edellä määritetyn sinisen ja punaisen värikanavasuhteen perusteella. Ohjelma 8:n funktiota voidaan kehittää jatkossa siten, että jaetaan ensin kohteesta otettu RAW-mittauskuva suuruudeltaan esimerkiksi 10x10 pikseliä kokoisiin osiin. Tämän jälkeen määritetään jokaiselle halutun suuruiselle osalle siinä esiintyvä pintalämpötila. Tällöin saadaan muodostettua kohteen lämpötilajakauma koko mittauskuvan alueelta. Mittaussovelluksesta riippuu halutaanko määrittää lämpötilajakauma koko mittauskohteelle vai halutaanko laskea pelkästään tietty pintalämpötila halutusta pienestä osasta kuvaa.

```
function
[i mage_data, BperR, max_B, max_R, AVGtemp]=laske_lampo_imperx(kansio, i mage_name);

% Funktio laskee halutusta raakakuvasta (RAW) kuvassa esiintyvien kuumien
% kohteiden pintalämpötilojen (Celsius) keskiarvon. Raakakuvat on otettu
% IMPERX:n IGV-B1410C-kameralla. Lämpötilat lasketaan Blue/Red -kanavista.
% Funktio hakee Blue/Red -värikanavien 100 suurinta pikseliarvoa ja laskee
% näiden perusteella lämpötilojen keskiarvon muuttujan 'AVGtemp'.

%% Luetaan kuva datakansioista ja siirretään se työhakemistoon
source=[kansio '\', i mage_name];
destination=[pwd '\', i mage_name];
copyfile(source, destination)
fid=fopen(i mage_name);
i mage_data=fread(fid, [1392 1040], 'uint16');
i mage_data=i mage_data';
fclose(fid); clear fid

%% Ladataan kamerakennon Bayer-matriisi ja erotellaan R/G/B-pikselit
load Bayer_imperx.mat
n_R=i mage_data.*B_R;
n_G=i mage_data.*B_G;
n_B=i mage_data.*B_B;

%% Määritellään laskettava alue. Vaihdeettava laskettavan kuvan mukaan!
%% Etsi analysoitavasta kuvasta alue, josta lämpötila halutaan laskea!
n_R_rajattu=n_R(min_y: max_y, min_x: max_x);
n_G_rajattu=n_G(min_y: max_y, min_x: max_x);
n_B_rajattu=n_B(min_y: max_y, min_x: max_x);
%% Ohjelma jatkuu seuraavalla sivulla →
```

```

%% Haetaan värikanavien 100 kirkkainta pikseli arvoa rajatulta/määritetystä
%% alueelta ja lasketaan niiden keskiarvot

max_R=sort(n_R_rajattu(:),'descend');
max_G=sort(n_G_rajattu(:),'descend');
max_B=sort(n_B_rajattu(:),'descend');
max_R=max_R(1:100);
max_G=max_G(1:100);
max_B=max_B(1:100);

KA_R=mean(max_R);
KA_G=mean(max_G);
KA_B=mean(max_B);

BperR=KA_B/KA_R;

%% Muunnetaan laskettu keskiarvojen suhde (BperR) lämpötilaksi AVGtemp [C]

T_diff=1;
T_C=400:T_diff:2200;

% Luetaan funktiossa kanavien_suhde_sony_ND13.m laskettu data!
load Sony_suhteet_ND13.mat

suhdeBR=spline(T,B_R_suhde,T_C);
[minka1,pikka1]=min(abs(suhdeBR-BperR));
AVGtemp=T_C(pikka1);

%% Poistetaan lopuksi kuvatiedosto työhakemistosta
delete([image_name])
end

```

Ohjelma 8. MATLAB-funktio *laske_lampo_imperx.m*: Funktio laskee mittauskohteen pintalämpötilan kohteesta otetusta RAW-mittauskuvasta. Funktiossa voidaan määrittää mistä osasta mittauskohdetta lämpötila halutaan laskea. Lämpötila lasketaan värikanavasuhteen ”Blue/Red” perusteella, kun käytettiin IMPERX Bobcat IGV-B1410C -kameraa ja sen kanssa Thorlabsin ND13A -harmaasuodinta. Kyseiselle mittausjärjestelylle ominainen lämpötilariippuvuus on tallennettuna datatiedostoon ”Sony_suhteet_ND13.mat”.

Vastaavalla tavalla voidaan määrittää mittauskohteen eri osissa esiintyviä pintalämpötiloja Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameralla otetusta NEF-mittauskuvasta kuvanottohetkellä. Pintalämpötilojen laskemiseksi NEF-mittauskuvan perusteella käytetään kennon värikanavien signaalisuhdetta $\varphi_{VIHR.} / \varphi_{PUN.}$. Tässä työssä kehitettiin Nikon D5000 -kameralla otetuille NEF-mittauskuville laskentaohjelmisto, joka laskee lämpötilajakautaman koko mittauskuvan alalle jakamalla kuva samankokoisiin halutun suuruisiin alueisiin. Kehitetyn laskentaohjelmiston MATLAB-ohjelmakoodi *laske_lampo_nikon.m* on esitetty työn lopussa liitteen A Ohjelma 9:ssä. Ohjelma 9:n laskentaohjelmistossa lasketaan ensin alueisiin ositetun NEF-mittauskuvan jokaiselle alueelle pikseliarvojen keskiarvojen suhde ”Vihreä / Punainen”. Sen perusteella määritetään aina kyseisessä kuvan alueessa esiintyvä kohteen pintalämpötila. Ohjelma 9:n kanssa samassa työhakemistossa on oltava *DNG.exe* -ohjelmätiedosto (*DNG converter* -ohjelmisto) tiedosto-

muodon muuntamista varten. Ennen kuin mittauskuva Nikon D5000 -kameralla otetaan, täytyy ottaa mittauskuvan kanssa samoilla mittausasetuksilla otettava pimeäkuva. Pimeäkuva otetaan pitämällä linssinsuojus kameran objektiivin edessä. Pimeäkuvan pikseliarvot vähennetään kehitetyssä laskentaohjelmassa varsinaisen mittauskuvan pikseliarvoista. Tällä taustavähennysjärjestelyllä saadaan kameran kennossa mahdollisesti esiintyvät virheelliset, niin sanotut kuumat pikselit, poistettua. Kennon rakenteessa usein esiintyvät virheelliset pikselit sotkevat lämpötilamittauksen tarkkuutta siinä osassa mittauskuvaa, jossa virheellinen pikseli esiintyy, ellei niitä taustavähennyksellä poisteta. Ohjelma 9 pyytää käyttäjää valitsemaan mittauskuvan ja pimeäkuvan tiedostot.

5. MITTAUSSOVELLUKSET

Edellisessä luvussa esiteltyjä värikamerapyrometrian mittalaitteita hyödynnettiin tässä diplomityössä kolmeen erilaiseen polttotekniikkaan liittyvään tutkimussovellukseen. Ensimmäisessä sovelluskohteessa mitattiin CCD-värikameralla yksittäisiä palavia polttoainehiukkasia tutkimuskäyttöön tarkoitettussa pudotusputkireaktorissa. Toisessa sovelluskohteessa mitattiin Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameralla korkealämpötilaau- nissa palavan rapsipelletin pintalämpötiloja palamisen eri vaiheissa ja rapsipelletin eri osissa. Kolmannessa sovelluskohteessa tutkittiin mahdollisuutta käyttää työn CCD-värikameraa leijupolttoprosessissa käytettävien kiintoaineiden emissiviteettiarvojen mittaukseen prosessin palamislämpötiloissa.

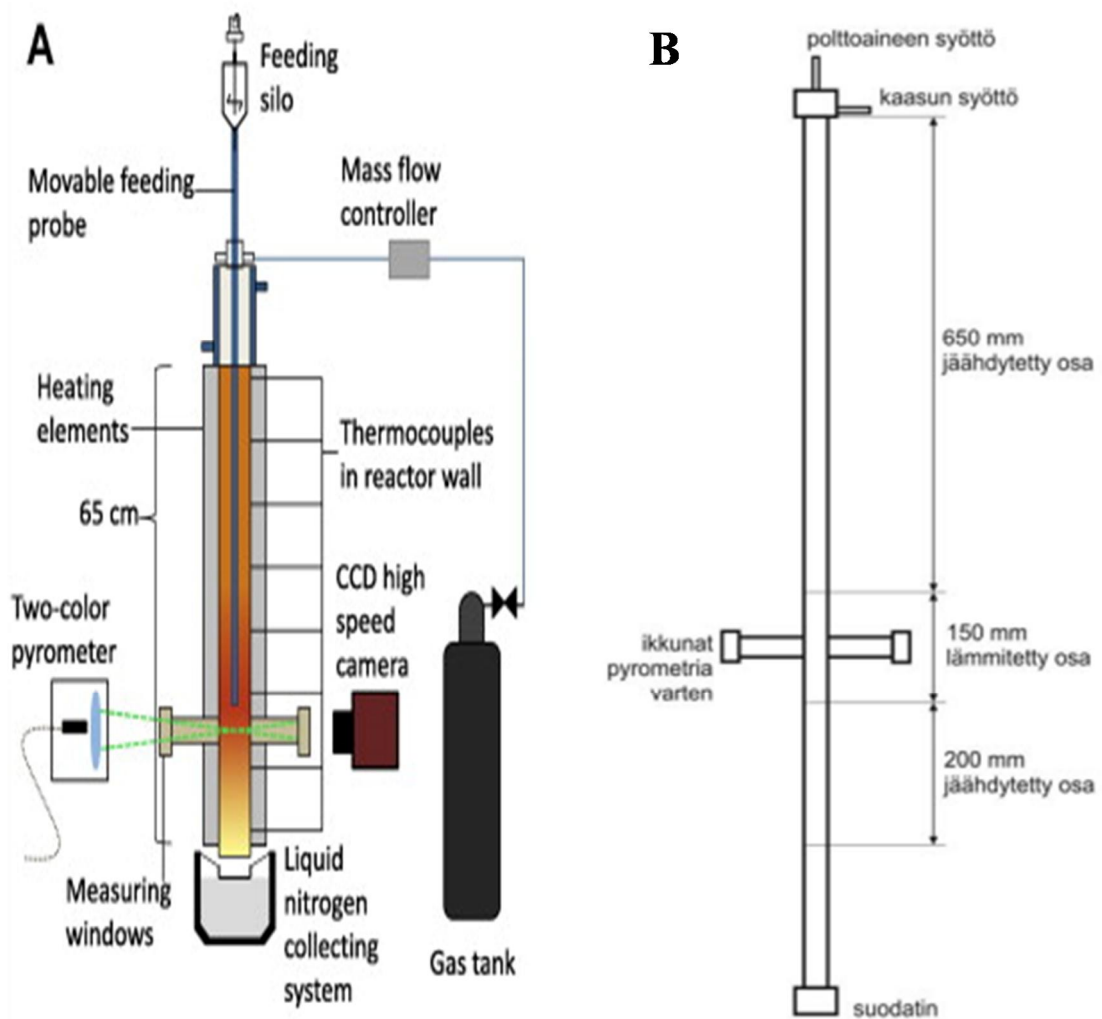
Mittausten tarkoituksena kaikissa sovelluskohteissa oli pääasiassa testata menetelmän toimivuutta mittausteknisesti sekä tehdä pohjaselvitystä siitä, mihin uutta värikameraa hyödyntävää mittaustekniikkaa voitaisiin jatkotutkimuksissa käyttää. Työn tarkoituksena oli myös löytää mahdollisimman laadukkaat ja sopivat mittalaitteet eri sovelluskoh- teiden tarpeisiin. Tässä luvussa esitellään työn mittaussovellukset tarkemmin sekä selvi- tetään miten kuvaan perustuvat värikamerapyrometrian mittaukset kyseisissä sovellus- kohteissa teknisesti onnistuvat. Luvussa esitetään lisäksi sovelluskohteissa suoritetuissa mittauksissa saavutettuja esimerkkituloksia.

5.1 Palavien polttoainehiukkasten mittaussovellus pudotusputkireak- torissa

Tampereen teknillisellä yliopistolla (TTY) on tehty erilaisiin energiatekniikan poltto- prosesseihin liittyvää kokeellista tutkimusta jo 1980-luvulta lähtien. Kokeellisessa tut- kimuksessa keskitytään erityisesti biomassapohjaisten polttoaineiden palamisomina- suuksien tutkimiseen. Tutkimuslaitteistona käytetään pudotusputkireaktoria (engl. *drop- tube reactor*). Se on nykyään tärkein tutkimuslaite polttoaineiden karakteristisia ominai- suuksia tutkittaessa. Pudotusputkireaktoria hyödyntämällä voidaan mitata reaktorissa palavien ja ylhäältä alas putoavien polttoainepartikkelien massanmenetystä, putoamis- nopeutta, halkaisijaa sekä palamisvaiheen pintalämpötilaa. Nämä ovat tärkeitä kineetti- siä parametreja CFD-laskentaa (engl. *computational fluid dynamics*) varten. Monikäyt- töisen CFD-laskennan avulla voidaan mallintaa matemaattisesti muun muassa palami- sessa tapahtuvia ilmiöitä.

Työn ensimmäisessä mittaussovelluksessa käytettiin TTY:n Energia- ja prosessitekni- kan laitoksen laboratoriossa valmistettua ja siellä käytössä olevaa pudotusputkireakto- ria. Reaktorin palamisolosuhteita voidaan säädellä. Säädettäviä suureita ovat reaktorin

kaasuatmosfäärin konsentraatio, kaasuvirtauksen nopeus sekä ympäröivä lämpötila. Reaktorilla suoritettavien polttoaineiden palamisominaisuusmittausten mittalaitteina on aikaisemmin käytetty TTY:lla kehitettyä kuituoptista kaksiväripyrometriaan perustuvaa hiukkasperimetria sekä mustavalkoisia kuvia ottavaa CCD-suurnopeuskameraa. Nämä mittalaitteet on esitelty tarkemmin Paanasen tutkimuksessa [5] ja Tolvasen tutkimuksissa [44] [45]. Reaktorissa käytetyllä hiukkasperimetrillä voidaan mitata polttoainehiukkasten pintalämpötilaa käyttäen mittausaallonpituuksina kahta kapeaa aallonpituuskais-taa kaksiväripyrometrian teorian mukaisesti. Mittausaallonpituuksiksi Paanasen kehittämään hiukkasperimetriin on valittu 1,0 ja 1,6 mikrometriä [5]. Mittaussovelluksen CCD-suurnopeuskameran ottamista mustavalkokuvista voidaan puolestaan määrittää pudotusputkireaktorissa palavien ja putoavien polttoainehiukkasten kokojakauma sekä putoamisnopeus. CCD-suurnopeuskamerana TTY:n tutkimussovelluksessa on käytetty kameramallia *AVT Marlin 145-B2* [44]. Pudotusputkireaktorin mittalaitteita käytetään reaktorin mittausikkunoiden kautta. Kuvassa 5.1 on esitetty pudotusputkireaktorin mit-tausjärjestely.



Kuva 5.1 Pudotusputkireaktorin toiminta ja mittausjärjestely. Kuva A on lainattu läh-teestä [44] ja kuva B on lainattu lähteestä [5].

Pudotusputkireaktorin mittaussovelluksessa ei ole mahdollista käyttää yhtäaikaaisesti kuituoptista hiukkaspyrometria ja CCD-suurnopeuskameraa. Tämä johtuu siitä, että hiukkaspyrometri tarvitsee mittauksen ajaksi taustasäteilynsuojauksen toiselle puolelle mittausikkunaa. Mustavalkokuvia ottava CCD-suurnopeuskamera tarvitsee puolestaan pudotusputkireaktorin mittausikkunan vastapuolelle pulssitetun valkoisen LED-valon, jotta putoavat hiukkaset pystytään kameralla vangitsemaan. Polttoprosessien kokeellisessa tutkimuksessa on tarve selvittää pudotusputkireaktoria käyttäen samanaikaisesti yksittäisten palavien partikkelien halkaisija, putoamisnopeus ja pintalämpötila. Tämä onnistuu, jos pystytään käyttämään polttoainehiukkasten mittaamisessa vain yhtä mitalaitetta. Erittäin sopiva mittalaite kyseiseen tarkoitukseen on esimerkiksi alaluvussa 4.2.1 esitelty *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikamera [13] [30]. CCD-värikameralla suoritettavalla kuvaan perustuvalla mittauksella pystytään saamaan selvillä yksittäisistä palavista polttoainehiukkasista niiden halkaisija, putoamisnopeus ja pintalämpötila samanaikaisesti. Tällä CCD-värikameramittauksella päästään käsiksi materiaalisissa palamismalleissa esiintyviin parametreihin, joita optimoimalla voidaan erilaisia polttoprosesseja kehittää energiatehokkaimmiksi.

Tässä työssä keskityttiin pääasiassa kehittämään uutta CCD-värikameralla suoritettavaa palavien polttoainehiukkasten lämpötilan mittausta pudotusputkireaktorissa. Mittaustekniikka pohjautuu työn luvussa 4 esitelyyn värikamerapyrometriaan. Mittalaitteeksi pudotusputkireaktorin mittaussovellukseen sopii erinomaisesti CCD-kuvakennoa mallilitaan *Sony ICX285AQ* käyttävä värikamera, josta on poistettu infrapunasuodin signaalin maksimoimiseksi [13]. Tässä kuvakennossa on normaalia voimakkaampi herkkyys lähi-infrapuna-alueella, minkä ansiosta mittaukseen saadaan riittävän suuri tarkkuus myös alhaisemmillä lämpötiloilla sekä riittävän laaja lämpötilamittausalue. Sony ICX285AQ onkin yksi parhaimmista ja suorituskykyisimmistä markkinoilla olevista CCD-värikuvakennoista värikamerapyrometrian mittaustarkoituksiin sen lähi-infrapuna-alueen voimakkaan herkkyyden ansiosta [13].

Palavia polttoainehiukkasia mitattiin pudotusputkireaktorissa *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikameralla, joka käyttää mainittua Sony ICX285AQ -kuvakennoa. Mittauksissa hyödynnettiin kameran suurnopeuskuvausominaisuuksia, koska ylhäältä tutkimusreaktoriin syötetyt polttoainehiukkaset putoavat alaspäin reaktorin kaasuvirtauksen nopeudesta riippuen keskimäärin 0,4 – 0,5 metrin sekuntinopeudella. Tämä tarkoittaa, että yksittäisen hiukkasen viipymäaika halkaisijaltaan 23,7 millimetriä olevan reaktorin mittausikkunan kohdalla on tällöin vain noin 47 – 60 millisekuntia. Suurnopeuskuvausominaisuuksien avulla putoavia hiukkasia saadaan vangittua enemmän ja suuremmalla todennäköisyydellä mittauskuviin. Suurnopeuskuvauksella päästään lisäksi käsiksi polttoainehiukkasten putoamisnopeuden ja hiukkaskoon mittaamiseen samanaikaisesti pintalämpötilan kanssa.

Työn mittausten pohjalta havaittiin, että reaktorissa putoavat hiukkaset täytyy saada vangittua mahdollisimman laajalle alalle kuvaan. Jos hiukkaset näkyvät vain pieninä

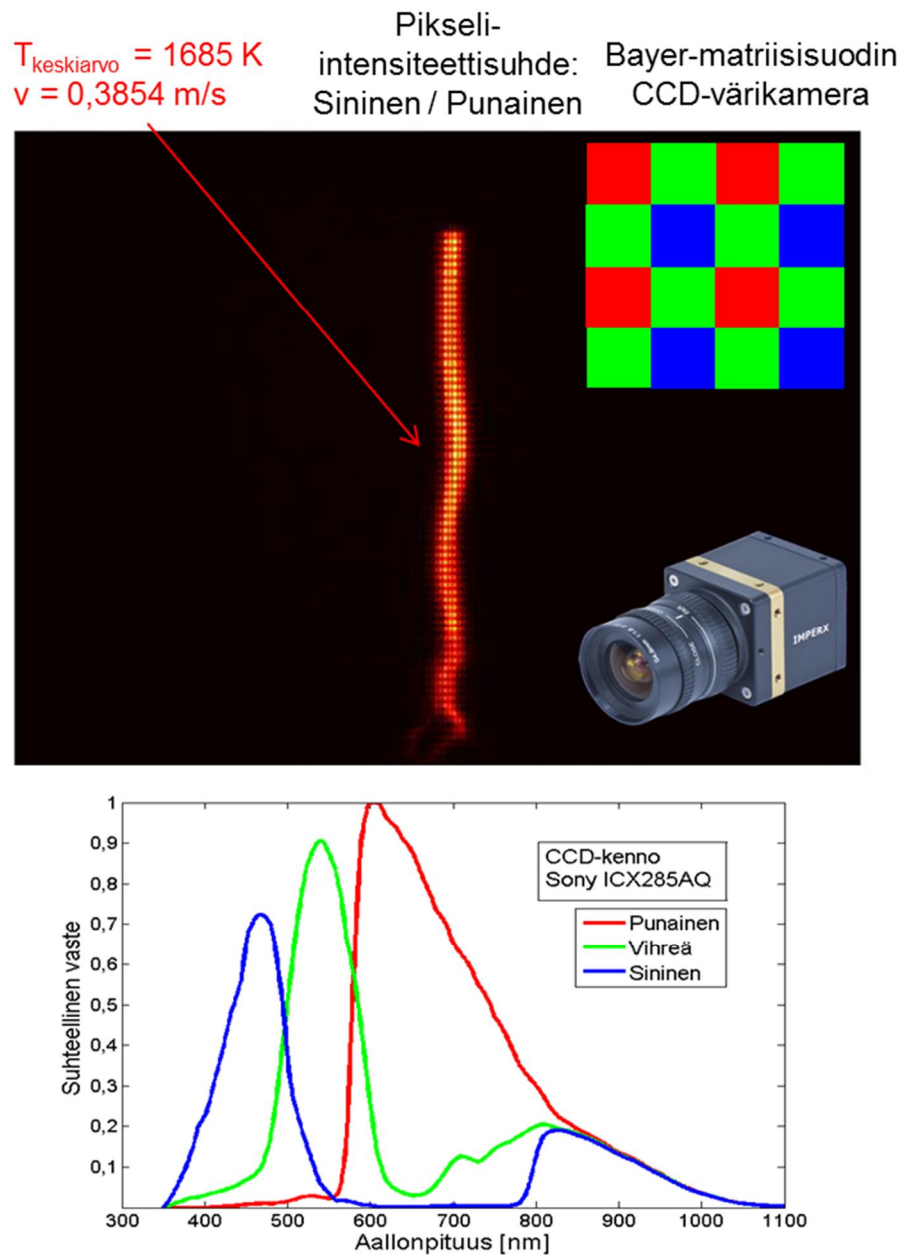
muutaman pikselin kokoisina pisteinä mittauskuvissa, niin riittävän tarkka lämpötilan määrittäminen ei ole tällöin mahdollista. Tästä syystä CCD-värikamerassa täytyy käyttää tarpeeksi pitkiä valotusaikoja, jotta mittaustarkkuutta saadaan paremmaksi. Hiukkaset pyritään taltioimaan mittauskuviin maksimissaan koko mittaussikkunan pituisiksi viivoiksi. Mittauksissa käytettävä valotusaika riippuu siten hiukkasen viipymäajasta mittaussikkunan kohdalla. Palavien hiukkasten viivat kattavat näin ollen riittävän määrän pikseleitä mittauskuvissa, jolloin hiukkasten pintalämpötilojen määrittäminen värikamerapyrometrialla on mahdollista.

Kuten alaluvussa 4.3 mainittiin, täytyy CCD-värikameran objektiivissa (malliltaan *Computar TEC-M55*) käyttää mittauskuvia otettaessa mahdollisimman suurta aukkoa diffraktioilmiön välttämiseksi. Suurella objektiivin aukolla kuumaa mittauskohdetta kuvattaessa vaarana on kuitenkin mittauskuvien pikselien saturoituminen. Saturoitumista voitaisiin välttää säätämällä kameran valotusaikaa pienemmäksi. Se ei kuitenkaan tässä pudotusputkireaktorin mittaussovelluksessa ole mahdollista edellä mainituista syistä. Reaktorissa palavia hiukkasia joudutaan kuvaamaan siis mahdollisimman suurella aukolla ja niin pitkällä valotusajalla, että kennon pikselit saturoituvat väistämättä. Pikselien saturoitumisen välttämiseksi joudutaan näin ollen tässä mittaussovelluksessa käyttämään harmaasuotimia objektiivin ja kameran välissä luvussa 4.3 esitellyllä tavalla. Sopivan vaimennusvoimakkuuden omaavat harmaasuotimet vaimentavat palavien hiukkasten emittoimaa valoa tasaisesti joka aallonpituudelta, jolloin mittauskuvien pikseliarvot pysyvät saturaatorajan alapuolella.

Eri polttoainehiukkasten pintalämpötiloja mitattiin työn kokeilumittauksissa tietokoneohjatuksi ottamalla IMPERX Bobcat CCD-värikameralla mittaussarjoja reaktorissa putoavista hiukkasista. Mittaussarjoja voidaan ottaa palavista hiukkasista reaktorin eri happipitoisuuksissa. CCD-värikameralla mitataan hiukkasia esimerkiksi minuutin ajan kuvataajuudella 10 kuvaa / sekunti reaktorin mittaussikkunan kautta. Kameralla otetut 600 mittauskuvaa tallentuvat tällöin Ethernet-verkkoyhteyden kautta tietokoneelle, jolla kameraa ohjataan. Tallennetuista mittauskuvista voidaan sen jälkeen tunnistaa kuviin osuneet hiukkaset sekä laskea niiden pintalämpötilat kuvanottohetkillä MATLAB-ohjelmistoa käyttäen. Pintalämpötilat lasketaan alaluvussa 4.4 esitellyn laskentaohjelmiston avulla. Mittaussarjojen mittauskuvista voidaan siten määrittää esimerkiksi keskimääräinen tietyn polttoainehiukkasen palamislämpötila määrityissä reaktorin happipitoisuudessa.

Seuraavan sivun kuva 5.2 esittää esimerkkimittauskuvan palavasta polttoainehiukkasesta ja sen mittaussarjajärjestelystä. Kameralla otetusta mittauskuvasta laskettiin lämpötilajakauma alaluvussa 4.4 esitellyllä tavalla käyttäen MATLAB-ohjelmistoa. Lämpötilajakaumakuvan pikseliarvoista määritettiin kuvassa esiintyvän palavan hiukkasen keskimääräiseksi pintalämpötilaksi kuvanottohetkellä 1685 kelvinastetta kameran värikanavasuhteen $\varphi_{SIN} / \varphi_{PUN}$ perusteella. Hiukkasen putoamisnopeudeksi reaktorissa laskettiin kuvaan perustuvan mittauksen avulla 0,3854 metriä sekunnissa. Putoamisno-

peuden määrittämiseksi lämpötilajakaumakuvan perusteella täytyy olla tiedossa yhden pikselin pituus kuvassa millimetreinä sekä valotusaika, jolla mittauskuva on otettu. Pikselin pituus saadaan selville mittauskuvan kanssa samoilla kameran mittausparametreilla otetun skaalauskuvan perusteella. Skaalauskuva voidaan ottaa esimerkiksi kalibroidusta mittatikusta ennen varsinaista hiukkasmittausta. Mittatikku asetetaan kylmän reaktorin sisälle keskelle mittausikkunaa ennen reaktorin käynnistämistä. Mittatikku valotetaan esimerkiksi valkoisella LED-valolla vastapuolelta reaktorin mittausikkunaa, jolloin skaalauskuvasta voidaan laskea pikselien lukumäärä / millimetri mittatikun mitausasteikon avulla.



Kuva 5.2 Esimerkkitmittauskuva pudotusputkireaktorissa palavasta polttoainehiukkasesesta. Mittauksessa käytettiin IMPERX Bobcat IGV-B1410C CCD-värikameraa, josta on poistettu infrapunasuodin [29].

Hiukkaskoon, putoamisnopeuden ja pintalämpötilan samanaikainen mitta- taus CCD-värikameralla

Tämän työn puitteissa keskityttiin pääasiassa kehittämään pudotusputkireaktorin tutkimussovellukseen edellä esiteltyä uutta värikamerapyrometrasta lämpötilan mittaustekniikkaa. Työssä kehitettyä lämpötilan mittaustekniikkaa voidaan jatkossa hyödyntää eri polttoaineiden ominaisuuksia tutkittaessa. CCD-värikameraa mittalaitteena käyttäen tutkimussovelluksessa on mahdollista mitata myös yksittäisten polttoainehiukkasten kokoa sekä putoamisnopeutta reaktorissa samanaikaisesti lämpötilamittauksen kanssa. Mittaustekniikka hiukkaskoon ja nopeuden mittaamiseksi samasta hiukkasesta pintalämpötilan kanssa vaatii spesifisempää laitteistoa. Tämän työn laitteiston kehitysmittauksissa tehtiin pohjaselvitystä siitä, minkälaista tekniikkaa kyseinen mittausprosessi vaatisi. Samasta hiukkasesta saadaan selville kaikki kolme haluttua parametria, kun hyödynnetään IMPERX Bobcat CCD-värikameran tuplavalotusominaisuutta (engl. *double exposure mode*). Tuplavalotuskuvauksen avulla kameralla pystytään ottamaan kaksi peräkkäistä kuvaa nopeasti ilman viivettä kuvien välillä [46]. Tuplavalotusominaisuus on suunniteltu nopeiden prosessien kuvaamiseen lyhyitä valotusaikoja käyttäen.

Tuplavalotus vaatii aina jonkinlaisen yksittäisen liipaisusignaalin (engl. *trigger pulse*), joka kertoo kameralle taajuuden, jolla peräkkäisiä tuplavalotuskuvia otetaan. Tuplavalotuksen kuvapari otetaan aina jokaisen CCD-kameran vastaanottaman liipaisusignaalin jälkeen. Liipaisusignaalinä voidaan käyttää kamerasisäänrakennettua pulssigeneraattoria tai ulkoista signaaligeneraattoria. Tuplavalotuskuvaparin ensimmäisen kuvan valotusaika on yhtä pitkä kuin liipaisusignaalin pulssin kesto [46]. Kuvaparin jälkimmäisen kuvan valotusaika on puolestaan yhtä pitkä kuin kennon määräämä kuvan lukunopeus. Tuplavalotusominaisuudessa CCD-kamera valottaa jälkimmäistä kuvaa samanaikaisesti yhtä pitkän ajan kuin ensimmäistä kuvaa luetaan kamerasisäiseltä kennolta.

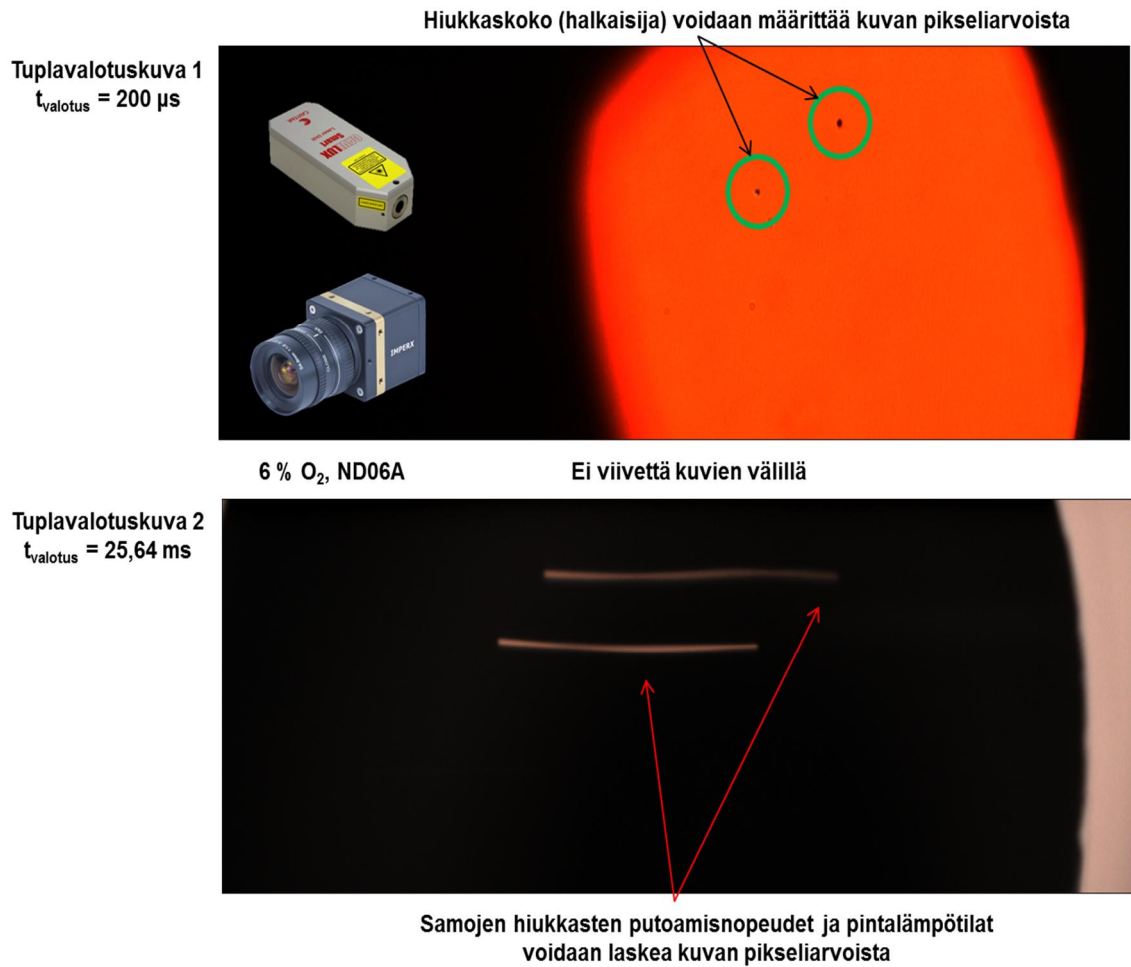
Mittausprosessi putoavan polttoainehiukkasen hiukkaskoon määrittämiseksi pudotusputkireaktorissa vaatii tuplavalotuskuvien ensimmäiseen kuvaan mahdollisimman lyhyttä valotusaikaa, jotta putoava hiukkanen saadaan pysäytettyä yhdeksi pisteeksi kuvaan. Työn kokeilumittauksissa ensimmäisen kuvan sopivaksi valotusajaksi todettiin 200 mikrosekuntia. Lyhyen valotusajan kuvasta voidaan siten määrittää yksittäisen hiukkasen keskimääräinen halkaisija kuvaan perustuvan mittauksen avulla, kun tiedossa on skaalausmittauksesta saatu yhden pikselin pituus kuvassa. Tuplavalotusominaisuuden liipaisusignaalin pulssin kesto on tällöin siis sama 200 mikrosekuntia. Tuplavalotuskuvien jälkimmäisen kuvan sopivaksi valotusajaksi määritettiin kokeilumittauksissa 25,64 millisekuntia. Tämä valotusaika on siis aina yhtä pitkä kuin kennon määräämä kuvan lukunopeus. CCD-värikameran käyttämälle ICX285AQ -kuvakennolle täyden resoluution (1392 x 1040 pikseliä) standardi lukunopeus on 1 / 15 sekuntia [31]. Kokeilumittauksissa mittauskuvien resoluutiota kavennettiin kuitenkin pystysuunnassa resoluutioon 1392 x 400 pikseliä, jotta jälkimmäisen kuvan valotusaika saatiin optimoitua ja reaktorissa putoavat hiukkaset saatiin suurennettua paremmin mittauskuviin. Tällä kenno-

resoluutiolla lukunopeus pienenee siten 25,64 millisekuntiin. Resoluution kaventamisen ansiosta CCD-värikameran kuvaustaajuutta saatiin myös kasvatettua. Resoluutiolla 1392 x 400 pikseliä CCD-värikameran kuvaustaajuus on 62 kuvaa / sekunti, kun käytetään kameran *over clocked* -ominaisuutta.

Tuplavalotuskuvien jälkimmäisen mittauskuvan valotusaika on siis huomattavasti pidempi kuin ensimmäisen kuvan. Jälkimmäiseen kuvaan kuvataan sama hiukkanen kuin ensimmäiseen kuvaan, koska tuplavalotuskuvat pystytään ottamaan ilman viivettä kuvien välillä. Jälkimmäisessä mittauskuvassa hiukkanen näkyy pitkänä viivana pidemmästä valotusajasta johtuen. Tällöin kuvasta voidaan laskea palavan hiukkasen putoamisnopeus sekä pintalämpötila kuvassa 5.2 esitellyllä tavalla. Koska kennoresoluutiota kavennettiin pystysuorassa, täytyi lisäksi CCD-kameran mittausasentoa kääntää 90° kulmaan normaaliasentoon nähden, jotta putoavat hiukkaset saatiin mahtumaan mittauskuviin. Tällöin hiukkaset ”putoavat” mittauskuvissa oikealta vasemmalle.

Pudotusputkireaktorin tuplavalotuskuvauksen mittausprosessiin tarvitaan edellä esitellyjen kameraominaisuuksien oheen jonkinlainen voimakasintensiteettinen pulssitettu taustavalonlähde reaktorin mittausikkunan vastapuolelle CCD-kameraa. Tällaisena valonlähteenä työn mittaustekniikan kehitysmittauksissa käytettiin *Cavitarin* valmistamaa *Cavilux Smart* -diodilaseria [47]. Se on suunniteltu muun muassa suurnopeuskamera-mittauksia varten. Cavilux Smart -diodilaser emittoi punertavaa laservaloa, jonka aallonpituus on 640 nanometriä. Diodilaserin avulla reaktorissa putoavien hiukkasten liike voidaan pysäyttää. Laser ja CCD-kamera toimivat tuplavalotuskuvauksen mittausprosessissa toisiinsa kytkettynä ja keskenään synkronoituna. Diodilaserista säädetään pulssitustaajuus, joka määrää CCD-kameran kuvaustaajuuden. Cavilux-laser välähtää tuplavalotuskuvia otettaessa aina sen ensimmäistä kuvaa valotettaessa. Toista kuvaa valotettaessa laser ei välähdä. Putoava hiukkanen näkyy siten ensimmäisessä kuvassa näkyvän laserspotin keskellä mustana pisteenä (kuvan valotusaika 200 mikrosekuntia). Mustaksi pisteeksi kuvatun hiukkasen koko voidaan näin ollen määrittää kuvaan perustuvalla mittaauksella. Artikkeleissa [48] ja [49] on esitetty laskentamenetelmä hiukkaskoon määrittämiseksi kameramittauskuvista ellipsisovitetta käyttäen. Tässä työssä kehitettyä tuplavalotuskuvausta hyödyntävää mittaustekniikkaa voidaan jatkotutkimuksissa kehittää eteenpäin käyttämällä teknologiapohjana edellä esiteltyä mittausprosessia.

Seuraavan sivun kuva 5.3 havainnollistaa tuplavalotuskuvauksen mittausprosessia. Kuvassa 5.3 on esitetty CCD-värikameran tuplavalotusominaisuudella otettu esimerkkimittauskuvapari käyttämällä taustavalonlähteenä Cavilux Smart -diodilaseria. Esimerkkimittauskuvapari otettiin pudotusputkireaktorissa 6 prosentin happipitoisuudessa palavista hiukkasista. Mittauksessa käytettiin IMPERX Bobcat CCD-värikameran kanssa harmaasuodinta pikseliarvojen saturoitumisen välttämiseksi. Käytetyn Thorlabsin ND06A-harmaasuotimen vaimennusvoimakkuus oli $OD = 0.6$ (optinen tiheys) [39]. Kuvaparin ensimmäisen kuvan valotusaika oli 200 mikrosekuntia ja jälkimmäisen kuvan valotusaika oli 25,64 millisekuntia.



Kuva 5.3 CCD-värikameran tuplavalotusominaisuuden esimerkkimittauskuvapari. Ensin otetussa kuvassa Cavilux-laser välähtää. Jälkimmäisessä kuvassa se ei välähdä. Pudotusputkireaktorissa mitattavat hiukkaset liikkuvat mittauskuvissa oikealta vasemmalle, koska CCD-värikameran asentoa käännettiin 90° normaalista mitta-asennosta pystysuuntaisen resoluution kaventamisen vuoksi. Reaktorin happipitoisuus oli 6 %.

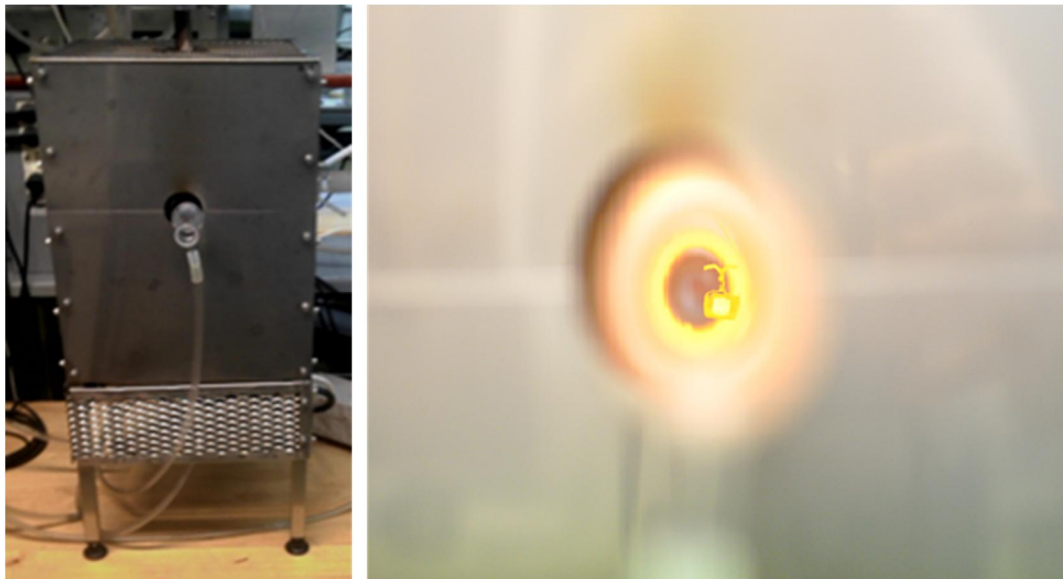
Yhden pikselin pituudeksi kuvan 5.3 mittauskuvaparille määritettiin skaalausmittauksen perusteella 14,3 mikrometriä. Mittauskuvapari luettiin MATLAB-ohjelmistoon hiukkaspametriien määrittämistä varten. Kuvaparissa esiintyville palaville polttoainehiukkasille (2 kpl) laskettiin kuvaan perustuvalla mittauksella alla olevan Taulukko 2:n mukaiset parametrit. Palamislämpötilat laskettiin MATLAB-funktiolla *laske_lampo_imperx.m* (Ohjelma 8). Hiukkaskoko arvioitiin hiukkasen pisimmän halkaisijan perusteella.

Taulukko 2. Kuvan 5.3 palaville polttoainehiukkasille lasketut parametrit.

Parametri	Ylempi hiukkanen	Alempi hiukkanen
Hiukkaskoko (halkaisija), kuva 1 [μm]	157 μm	115 μm
Palamislämpötila, kuva 2 [K]	1610 K	1611 K
Putoamisnopeus, kuva 2 [m/s]	0,253 m/s	0,222 m/s

5.2 Palavan rapsipelletin pintalämpötilajakauman mittaus

Tämän diplomityön toisessa sovelluskohteessa tutkittiin yksittäisen palavan rapsipelletin pintalämpötiloja palamisen eri vaiheissa ja rapsipelletin eri osissa. Rapsipellettejä voidaan käyttää biopolttoaineena energiantuotannossa. Niitä valmistetaan kasviperäisestä rapsiöljystä. Värikamerapyrometrian mittaustekniikkaa sovellettiin rapsipelletin mittaamiseen käyttämällä mittalaitteena *Nikon D5000* CMOS-järjestelmäkameraa. Mittaukset suoritettiin osana laajempaa polttoprosessien seurantaan liittyvää tutkimusohjelmaa Åbo Akademin Prosessikemian keskuksen laboratoriossa Turussa. Laboratoriossa oli käytössä korkealämpötilauuni (*single particle furnace*), jossa yksittäisen polttoainepartikkelin palamista voidaan tutkia kontrolloiduissa olosuhteissa. Laboratoriuuni koostuu lämpövastuksista ja kvartsiputkesta, jonka sisähalkaisija on noin 45 millimetriä ja pituus noin yksi metri. Verkkokoriin asetettu halkaisijaltaan noin 15 millimetrin kokoinen rapsipelletti syötettiin uunin sisälle kvartsiputken avulla. Uunissa palavaa pellettiä voitiin sen jälkeen mitata uunin mittausikkunan kautta. Uuniin syötettävien kaasujen koostumuksia (typpi / argon / happi) ja pitoisuuksia voitiin säätää halutuiksi. Kuvassa 5.4 on esitetty korkealämpötilauunin mittausjärjestely rapsipelletin mittaamiseen.

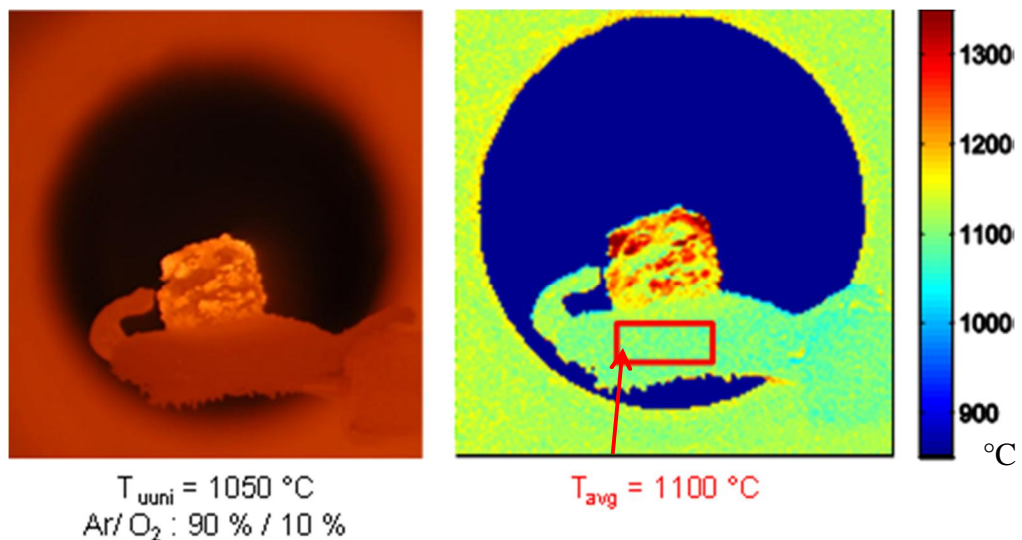


Kuva 5.4 Korkealämpötilauunin mittausjärjestely palavan rapsipelletin pintalämpötilajakauman mittaamiseen. Oikeassa kuvassa näkyy uunin sisälle verkkokoriin asetettu rapsipelletti.

Edellä kuvattu värikamerapyrometrian mittausjärjestely mahdollistaa palamisreaktion seuraamisen korkealämpötilauunissa palavan mittauskohteen eri osissa. Työn mittauksissa Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameralla otettiin palavasta rapsipelletistä mittauskuvia korkealämpötilauunin mittausikkunan kautta. Järjestelmäkameran mittausasetuksissa käytettiin suurinta mahdollista objektiivin aukkoa f/1.8. Tällöin vältettiin mittaustuloksia vääristävän diffraktioilmiön syntyminen objektiivin aukon reunoista. Nikon D5000 -kamerarungon kanssa käytetty objektiivi oli malliltaan *Nikkor AF-S DX 35mm*

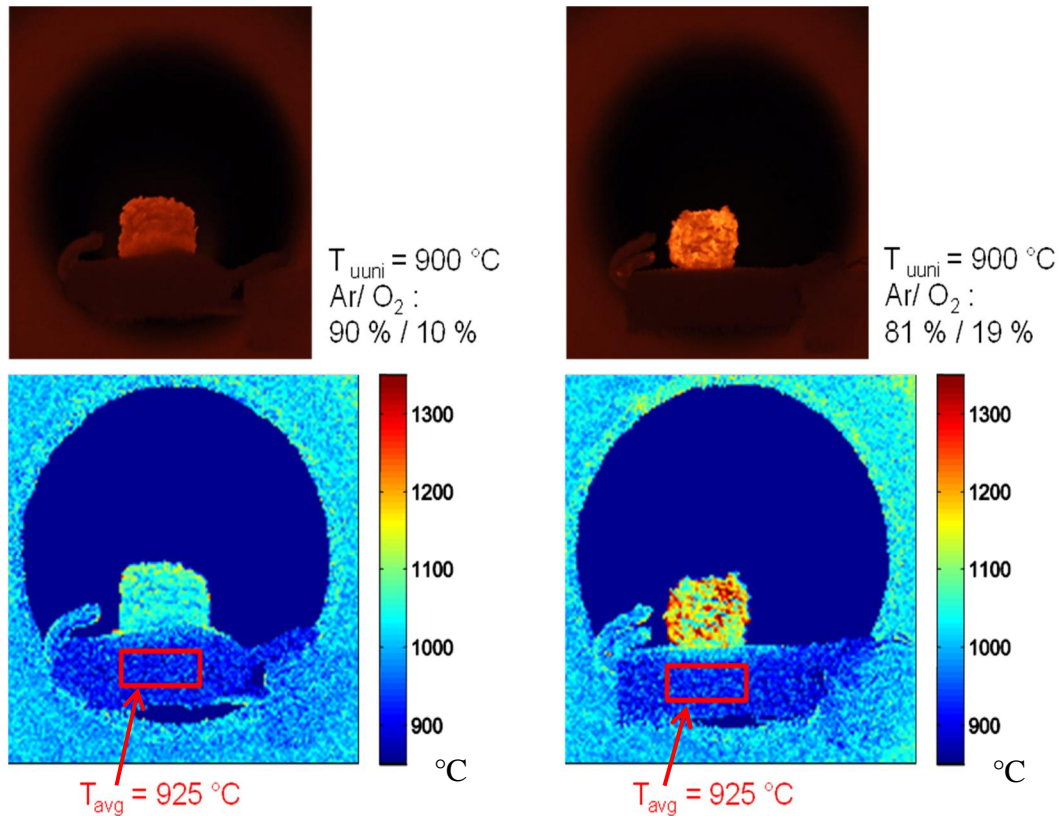
$f/1.8G$ [40]. Suurella aukolla kuvattaessa täytyi siten käyttää mahdollisimman lyhyttä valotusaikaa, koska muuten vaarana on mittauskuvan ylivalottuminen palavan pelletin hehkuessa niin kirkkaana. Lyhyellä valotusajalla vältettiin siis kennon pikselien saturoituminen. Sopivaksi Nikon D5000:n valotusajaksi työn mittauksissa todettiin $1 / 3200$ sekuntia. Tällöin mittaushetkestä tuleva signaali ei ole liian pieni, eikä liian suuri. Mittauskuvat otettiin NEF-tiedostomuodossa, jotta ne voitiin lukea MATLAB-laskentaohjelmistoon (liite A) lämpötilajakauman laskemista varten.

Palavasta rapsipelletistä otetuista mittauskuvista muodostettiin pintalämpötilajakaumat tässä työssä kehitetyn laskentaohjelmiston avulla. Pintalämpötilajakauman laskemiseen käytettiin värikamerapyrometrian teorian mukaisesti Nikon D5000 -järjestelmäkameran kuvakennon värikanavien signaalisuhdetta $\varphi_{VIHR} / \varphi_{PUN}$. Alla olevassa kuvassa 5.5 on esitetty MATLAB-ohjelmistolla laskettu ja piirretty pintalämpötilajakaumakuva pelletistä, joka paloi kymmenen prosentin happipitoisuudessa. Uunin lämpötilaksi oli asetettu 1050 celsiusastetta. Pintalämpötilajakaumakuva laskettiin jakamalla mittauskuva 4×4 pikseliä kokoisiin alueisiin. Kuvan 5.5 rapsipelletin mittauskuva on otettu noin 100 sekuntia sen jälkeen kun pelletti asetettiin korkealämpötilauuniin.



Kuva 5.5 Esimerkkitilamittauskuva palavasta rapsipelletistä ja siitä lasketusta pintalämpötilajakaumasta. Vasen kuva esittää CMOS-järjestelmäkameralla otetun mittauskuvan pelletistä. Oikea kuva esittää kyseisestä mittauskuvasta lasketun pintalämpötilajakauman. Laboratoriuunin kaasupitoisuudet olivat: Argon 90 % / happi 10 %.

Seuraavan sivun kuvassa 5.6 on esitetty pintalämpötilajakaumat palavasta pelletistä kahdessa eri happipitoisuudessa, kun uunin lämpötilaksi oli asetettu 900 celsiusastetta. Nämä jakaumakuvat muodostettiin vastaavalla tavalla kuin edellä kuvaan 5.5. Kuvan 5.6 rapsipelletin mittauskuvat on otettu samoin noin 100 sekuntia sen jälkeen kun pelletti asetettiin korkealämpötilauuniin. Kuvasta 5.6 havaitaan, että suuremmalla happipitoisuudella pelletillä on korkeampi palamislämpötila.



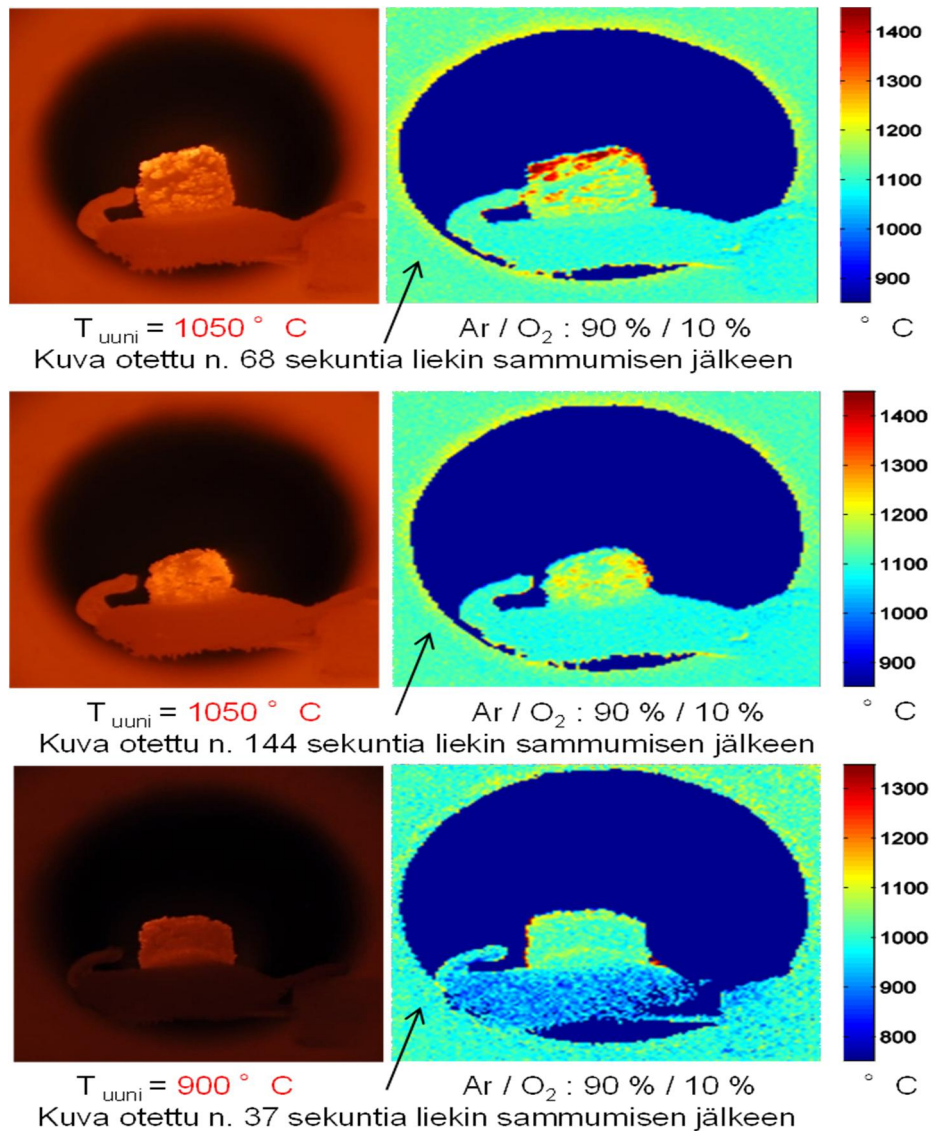
Kuva 5.6 Kaksi Nikon D5000 -järjestelmäkameralla otettua mittauskuvaa palavasta rapsipelletistä laboratoriuunin lämpötilan ollessa $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vasemmalla on esitetty kymmenen prosentin happipitoisuudessa palava pelletti ja oikealla 19 prosentin happipitoisuudessa palava pelletti. Pinta- $\text{lämpötilajakaumakuvat}$ laskettiin jakamalla mittauskuvat 4×4 pikseliä kokoisiin alueisiin.

Kuvista 5.5 ja 5.6 voidaan päätellä, että jakaumakuviin lasketut lämpötilat ovat luultavasti jonkin verran suurempia kuin todelliset uunissa esiintyvät lämpötilat, koska uunin seinät näyttävät hehkuvan jakaumakuvissa hieman kuumempina kuin uunin lämpötilasäätimen lukema antaisi olettaa. Uunin lämpötilasäätimessäkin voi olla hieman mittausvirhettä, mutta todennäköisesti muutaman kymmenen asteen suuruinen ilmeinen mittausvirhe työssä suoritetuissa mittauksissa johtuu pääasiassa käytetyn järjestelmäkameran infrapunasuotimen epäideaalisuudesta. Nikon D5000:n rungon sisällä kuvakennon päällä oleva infrapunasuodin päästää siis läpi hieman myös lähi-infrapuna-alueen lämpösäteilyä. Lämpötilajakaumakuvat palavasta pelletistä muodostettiin olettamalla, että kameran kuvakenno on herkkä pelkästään näkyvän valon aallonpituusalueelle: $400 - 700\text{ nanometriä}$ (alaluku 4.2.2). Mittaustarkkuutta saataisiin parannettua, kun käytettäisiin ultraviolett- ja infrapunavalon blokkaukseen tarkoitettua suodinta ("UV/IR Cut-Off") kameran objektiivin edessä, kuten työn alaluvussa 4.3 on kuvattu. Tällöin voidaan varmistua siitä, että kuvakennolle tuleva lämpösäteily sisältää ainoastaan näkyvän valon aallonpituuksia.

Työssä suoritettujen mittausten perusteella voitiin todeta, että edellä esitetty mittausjärjestely Nikon D5000 -järjestelmäkameralla mahdollistaa pinta- $\text{lämpötilajakaumien}$ muo-

dostamisen korkealämpötilauunissa palavasta rapsipelletistä, tai jostain muusta polttoainepartikkelista, muutaman kymmenen celsiusasteen mittaustarkkuudella. Tämän työn puitteissa keskityttiin kehittämään toimiva värikamerapyrometrian mittaustekniikka palavan polttoainepartikkelin mittaamiseen jatkotutkimuksia varten. Mittaustekniikan avulla voidaan näin ollen jatkossa suorittaa tarkempia polttoprosessin seurantaan liittyviä tutkimuksia esimerkiksi rapsipelletistä.

Alla olevassa kuvassa 5.7 on esitetty vielä havainnollisuuden vuoksi kolme mittauskuvaa ja niistä muodostettua pintalämpötilajakaumakuva uunissa palavasta rapsipelletistä. Kuvan 5.7 pintalämpötilajakaumat laskettiin samalla tavalla kuin edellä jakamalla mittauskuvat 4 x 4 pikseliä kokoisiin alueisiin.



Kuva 5.7 Kolme Nikon D5000 -järjestelmäkameralla otettua mittauskuvaa ja niistä muodostettua pintalämpötilajakaumakuva kymmenen prosentin happipitoisuudessa palavasta rapsipelletistä. Kuviin on merkitty uunin lämpötilat kussakin kuvassa. Kameran valotusaikana käytettiin jokaisessa kuvassa 1 / 3200 sekuntia.

5.3 Leijupoltossa käytettävien kiintoaineiden emissiviteetin mittaus

Työn kolmannessa sovelluskohteessa tutkittiin värikamerapyrometrian soveltuvuutta kuumen mittauskohteen emissiviteetin määrittämiseen. Tavoitteena oli testata värikamerapyrometrian mittausmenetelmää leijupolttoprosessissa käytettävien kiintoaineiden emissiviteettiarvojen mittaamiseen prosessin palamislämpötiloissa. Mittalaitteena emissiviteettimittauksessa käytettiin alaluvussa 4.2.1 esiteltyä *Imperx Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikameraa.

Leijupoltto on yksi tärkeimmistä menetelmistä polttaa kiinteää polttoainetta, esimerkiksi biomassaa, ympäristöystävällisesti. Leijupoltossa polttoainetta poltetaan leijukerroskattilassa pedissä, joka muodostuu palamattomista kiintoaineista. Leijupolttoprosessissa kiintoaineiden palamislämpötila vaihtelee noin 750 – 900 celsiusasteen välillä [50]. Leijupolttoprosessissa tapahtuvaa palamista voidaan mallintaa matemaattisesti. Kiintoaineiden emissiviteettiarvot ovat kiinnostavia matemaattisen palamismallin kannalta. Motivaationa tutkimukselle on matemaattisen mallin yksinkertaistuminen, jos leijupedin eri kiintoaineille voitaisiin oletusarvoisesti käyttää suunnilleen samoja emissiviteettiarvoja. Tässä työssä tutkittiin mahdollisuutta mitata leijupoltton kiintoaineiden emissiviteettiarvoja. Työssä selvitettiin myös millaista laitteistoa kyseinen mittausta vaatisi. Kiinnostavia kiintoaineita, joiden emissiviteettiä voitaisiin jatkotutkimuksissakin mitata esitellyllä mittaustekniikalla, ovat: kiertoleijupetikattilan (engl. *circulating fluidized bed*) petihiekka (CFB-hiekka), leijukerroskattilaan muodostuva pohjatuhka, kattilan loop-seal-materiaali, leijukerroskattilan kvartsihiekka (CFB-kvartsihiekka) sekä korkeatuhkainen loop-seal-materiaali.

Kiintoaineiden emissiviteetin mittausta perustuu hehkuvasta näytteestä emittoituvan lämpösäteilyn voimakkuuden mittaamiseen. CCD-värikamera toimii menetelmässä kamerapyrometrina, jolla voidaan mitata kuumien kohteiden lämpötiloja. Kohteesta otettujen digitaalisten värikuvien pikselien intensiteettiarvoista voidaan lämpötilan lisäksi määrittää myös mittauskohteen emissiviteetti artikkelissa [51] esitetyn menetelmän perusteella. Artikkelissa on käytetty erilaista CCD-värikameraa kuin tässä työssä oli käytössä. Mittausmenetelmä on kuitenkin samankaltainen. Artikkeliin [51] pohjautuvassa menetelmässä mittauskohde oletetaan harmaaksi säteilijäksi, eli oletetaan että kohteen emissiviteetti ($\epsilon < 1$) pysyy vakiona kaikilla mittausaallonpituuksilla 350 – 1100 nanometriä.

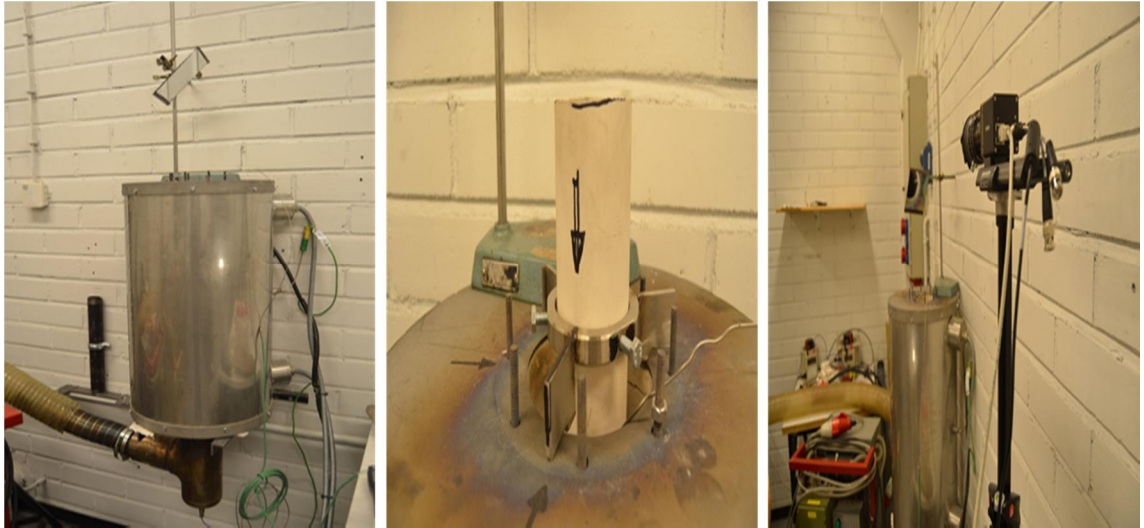
Artikkelissa [51] esitetyssä emissiviteetin mittausmenetelmässä ei tarvitse tietää käytetyn värikameran kennon spektristä signaalivastetta, vaan mittauskohteen emissiviteetti voidaan määrittää pelkästään kohteesta otettujen värikuvien pikseliarvojen (esimerkiksi punaisten pikselien) vertailun perusteella. Tällöin menetelmässä täytyy käyttää jotain referenssisäteilylähdettä, jonka avulla suoritetaan mittauksen kalibrointi. Artikkelissa [51] on käytetty referenssisäteilylähteenä teknistä mustan kappaleen säteilijää, jonka

emissiviteetti on $\epsilon = 0,99$. Tällöin varsinaisesta mittauskohteesta otetun kuvan pikseliarvoja voidaan verrata referenssisäteilylähteestä otetun kuvan pikseliarvoihin aina kulloinkin kyseessä olevassa mittauslämpötilassa. Pikseliarvojen suhteesta saadaan laskettua mittauskohteen emissiviteettiarvo. Mittauskohteen emissiviteetti voidaan määrittää halutussa lämpötilassa pikseliarvojen vertailun perusteella, kun tiedetään referenssisäteilylähteen emissiviteettiarvo (esimerkiksi tekniselle mustalle kappaleelle $\epsilon = 0,99$) kyseessä olevassa lämpötilassa ja käytetyn kameran mittausaallonpituusvälille.

Tämän työn puitteissa ei ollut mahdollisuutta käyttää kallista teknistä mustan kappaleen säteilijää referenssisäteilylähteenä. Sen sijaan menetelmää testattiin käyttämällä referenssisäteilylähteenä erityistä muun muassa tieteelliseen käyttöön tarkoitettua kvartsikiekkoa (*fused quartz*), jonka avulla emissiviteettimittauksen kalibrointi voidaan suorittaa. Kiekko on 99,995 prosenttisesti puhdasta kvartsia. *Fused quartz* -materiaalin emissiviteetti on tunnettu eri lämpötiloissa, jolloin sen avulla voidaan määrittää kiintoaineiden emissiviteettiarvot eri lämpötiloissa pikseliarvojen vertailumenetelmällä. Tunnetut *Fused quartz* -materiaalin emissiviteettiarvot eri lämpötiloissa saadaan selville esimerkiksi lähteiden [52] ja [53] artikkeleista ($\epsilon \approx 0,40$ leijupolttoprosessin lämpötiloissa)

CCD-värikameralla otettavat mittauskuvat sekä kalibroinnissa käytetystä kvartsikiekosta, että itse kiintoainenäytteistä täytyy ottaa aina samoilla mittausparametreilla. Muussa tapauksessa pikseliarvojen vertailu ei onnistu, sillä esimerkiksi kameran aukkoarvoa muutettaessa kameran mittaaman säteilyn voimakkuus muuttuu, jolloin pikseliarvot eivät ole vertailukelpoisia eri mittausten välillä. Mittausparametrit, jotka täytyy pitää mittausten ajan koko ajan samoina eri näytteitä mitattaessa, ovat: mittausetäisyys kameralta näytteeseen, kameran objektiivin aukkoarvo sekä kameran valotusaika. Myös kennon valoherkkyys (ISO-arvo) täytyy pitää mittausten välillä samana, samoin kuin valko-tasapainosäädöt eri kennon värikanaville.

Edellä kuvattua värikamerapyrometrian pikseliarvojen vertailumenetelmää testattiin tämän työn puitteissa TTY:n Energia- ja prosessiteknikan laitoksen laboratoriossa käytössä olleessa putkiuunissa. Putkiuunin pohjalle sijoitettuja kiintoaineita ja referenssisäteilylähteenä käytettyä kvartsikiekkoa mitattiin *Imperx Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikameralla. Seuraavalla sivulla oleva kuva 5.8 havainnollistaa putkiuunin mittausjärjestelyä. Kiintoaineet voitiin kuumentaa leijupolttoprosessissa käytettyihin lämpötiloihin putkiuunin avulla. Ongelmalliseksi työssä suoritettujen testimittausten tarkkuuden kannalta muodostui kuitenkin koelaitteistona käytetty putkiuuni, jonka lämpövastusten voimakas lämpösäteily uunin sisäseinämistä säteili myös mittalaitteena käytetylle kameralle häiriten siten voimakkaasti mitattavasta näytteestä emittoituvaa lämpösäteilyä. Tähän ongelmaan ratkaisuksi kehitettiin putkiuuniin upotettava keraamiputki, jonka läpi uunin pohjalle sijoitettuja näytteitä mitattiin CCD-värikameralla. Keraamiputken avulla pyrittiin eliminoimaan uunin lämpövastuksista aiheutuvaa häiritsevää lämpösäteilyä.



Kuva 5.8 Koelaitteistona työn emissiviteetin mittaustekniikan kehitysmittauksissa käytetty putkiuuni ja sen mittausjärjestely. Oikeanpuolimmaisessa kuvassa näkyy CCD-värikameran sijoittelu. Lämpösäteily johdettiin kameralle putkiuunin päälle asetetun peilin avulla.

Tässä työssä käytössä olleella koelaitteistolla ei kuitenkaan pystytty keraamiputkeakaan käyttämällä erottamaan näytteestä emittoituvaa lämpösäteilyä koelaitteistosta itsestään peräisin olevasta lämpösäteilystä. Tämä johtopäätös voitiin tehdä, kun mittaustekniikan kehitysmittauksissa mittaustuloksiksi saatiin kaikille mitatuille näytteille suunnilleen samoja emissiviteettiarvoja kuin tunnetulle referenssisäteilylähteelle aina kyseisessä mittaustilassa. Mitatut pikseliarvot kaikissa leijupolttoprosessin palamislämpötiloissa olivat siis suunnilleen samansuuruisia sekä mitatuille kiintoaineille että referenssisäteilylähteenä käytetylle kvartsiekolle. CCD-värikameralle kulkeutuva lämpösäteily oli työn testimittauksissa siis lähes kokonaan peräisin koelaitteistona käytetyn kuumentetun putkiuunin lämpövuoksista itsestään.

Artikkelissa [51] esiteltyä pikseliarvojen vertailumenetelmää voitaisiin joka tapauksessa käyttää jatkotutkimuksissa kiintoaineiden emissiviteettiarvojen määrittämiseen. Mittauksia varten rakennettava koelaitteisto tulisi kuitenkin suunnitella paremmin. Mittalaitteena voitaisiin käyttää esimerkiksi tämän työn *Imperx Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikameraa ja referenssisäteilylähteenä mahdollisuuksien mukaan laboratoriokäyttöön tarkoitettua teknistä mustan kappaleen säteilylähdettä. Vaatimuksena paremmalle koelaitteistolle on se, että mittalaitteena käytetylle kameralle kulkeutuva lämpösäteily olisi kokonaan peräisin ainoastaan mitattavasta näytteestä. Tämä vaatisi esimerkiksi jonkinlaisen jäähdytysvesikierron koelaitteistona käytettävän uunin jäähdyttämiseen.

6. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, miten hyvin erilaisissa energiantuotannon polttoprosesseissa esiintyviä korkeita lämpötiloja voidaan mitata digitaalisen värivalokuvauksen avulla. Työssä luotiin teknologiapohja digitaalisella värikameralla suoritettavaan optiseen korkealämpötilamittaukseen. Demonstroitu kompakti mittaustekniikka on nimeltään värikamerapyrometria. Värikamerapyrometrian avulla on mahdollista seurata palamisreaktioiden etenemistä sekä mitata polttotekniikan matemaattisissa palamismalleissa esiintyviä tärkeitä parametreja, kuten palamislämpötilaa ja polttoainepartikkelin kokoa. Palamismallien parametreja optimoimalla polttoprosesseja on mahdollista kehittää puhtaammiksi ja energiatehokkaammiksi.

Työssä tutkittiin mitkä ovat sopivia mittalaitteita ja mitä ominaisuuksia mittalaitteelta vaaditaan värikamerapyrometrian mittauksiin. Sopiviksi laitteiksi valittiin kaksi erilaista värikameraa, joita työssä suoritetuissa mittauksissa käytettiin. Käytössä olleet digitaaliset värikamerat olivat tutkimus- ja teollisuuskäyttöön tarkoitettu CCD-suurnopeuskamera *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* sekä kaupallinen pääasiassa kuluttajavalokuvaukseen tarkoitettu CMOS-järjestelmäkamera *Nikon D5000*. Molempien kameroiden kuvakennojen ominaisuudet todettiin olevan suotuisat käytettyä mittaustekniikkaa varten. Mittauksissa käytetyille kameroille suunniteltiin lämpötilojen laskentaohjelmistot. Ohjelmistojen avulla voidaan laskea kuumien mittaushkohteiden pintalämpötiloja ja pintalämpötilajakaumia kameroilla otetuista mittauskuvista. Laskentaohjelmistot sekä ohjelmistoilla suoritettava data-analyysi mittauskuville kehitettiin tätä työtä varten MATLAB-ohjelmointikielen avulla.

Käytetty mittaustekniikka perustuu kaksiväripyrometrian teoriaan. Siinä säteilyvoimakkuutta mitataan kahdella toisiaan lähellä olevalla kapealla aallonpituuskaistalla. Mittalaitteena toimiva digitaalinen värikamera tallentaa kuvakennonsa avulla kuumen mittaushkohteen emittoiman lämpösäteilyn voimakkuutta kuvaavat pikseliarvot tuotettuun digitaaliseen valokuvaan. Kuvakenno jakaa lämpösäteilyn kolmelle eri värikanavalle. Värikanavien pikseliarvoista voidaan määrittää palavan mittaushkohteen pintalämpötila halutussa osassa kohdetta, kun tunnetaan kennon värikanavien herkkyysvasteet eri aallonpituuksilla. Lämpötilan määrittämiseksi käytetään kennon kahta värikanavaa. Mittaustekniikan avulla voidaan määrittää myös kuumien mittaushkohteiden lämpötilajakaumia halutulla ajanhetkellä jakamalla kohteesta otettu mittauskuva halutun suuruisiin osiin.

Valittuja mittalaitteita hyödynnettiin kolmeen erilaiseen polttotekniikkaan liittyvään tutkimussovellukseen. Ensimmäisessä sovelluskohteessa kehitettiin CCD-värikameralla

suoritettava mittausprosessi yksittäisten palavien polttoainehiukkasten mittaamiseksi tutkimuskäyttöön tarkoitettussa pudotusputkireaktorissa. Toisessa sovelluskohteessa mitattiin Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameralla korkealämpötilauunissa palavan rapsipelletin pintalämpötiloja palamisen eri vaiheissa ja rapsipelletin eri osissa. Kolmannessa sovelluskohteessa tutkittiin mahdollisuutta käyttää työn CCD-värikameraa leijupolttoprosessissa käytettävien kiintoaineiden emissiviteetti-arvojen mittaukseen prosessin palamislämpötiloissa. Mittausten tarkoituksena kaikissa sovelluskohteissa oli todentaa menetelmän toimivuutta mittausteknisesti sekä tehdä pohjaselvitystä värikameraa hyödyntävän mittaustekniikan tulevaisuudennäkymistä jatkotutkimuksia varten.

Työssä toteutettiin CCD-suurnopeusvärikameraan perustuva mittalaite, jolla yksittäisen palavan polttoainehiukkasen pintalämpötilaa ja fyysistä kokoa voitiin mitata kaksiväripyrometriaa soveltaen. Mittalaite suunniteltiin polttoainehiukkasten palamisominaisuuksien tutkimuslaitteistona käytettävään pudotusputkireaktoriin. Työssä toteutetun mittausjärjestelyn avulla myös yksittäisen hiukkasen putoamisnopeus reaktorissa on mahdollista mitata yhtäaikaaisesti hiukkasen pintalämpötilan ja koon kanssa. Mittausjärjestelyssä käytettiin apuna *Cavilux Smart* -diodilaseria, jota käyttämällä putoavan hiukkasen liike voitiin reaktorissa pysäyttää kuvantamista varten. Mittauslaitteistolle kehitettiin laskentaohjelmisto polttoainehiukkasen pintalämpötilan laskemiseksi CCD-värikameralla otetusta mittauskuvasta. Suunniteltua mittauslaitteistoa voidaan jatkotutkimuksissa hyödyntää eri polttoainehiukkasten ominaisuuksien tutkimiseen pudotusputkireaktorilla.

Toisena sovelluskohteena värikamerapyrometrian mittaustekniikkaa käytettiin laboratorioreaktorissa palavan rapsipelletin pintalämpötilojen mittaamiseen. Työssä suunniteltua mittausprosessia voitiin käyttää reaktorissa palavan rapsipelletin palamisreaktion seuraamiseen, kun muodostettiin pintalämpötilajakaumia pelletille palamisen eri vaiheissa. Mittalaitteena rapsipelletin mittaamiseen käytettiin Nikon D5000 CMOS-järjestelmäkameraa. Työssä suunniteltiin CMOS-järjestelmäkameralla otetuille mittauskuville laskentaohjelmisto, jonka avulla voidaan laskea pintalämpötilajakaumia pikseleittäin mille tahansa palavalle polttoainepartikkelille. Suunniteltua mittausprosessia on jatkossa mahdollista hyödyntää, kun suoritetaan tarkempia polttoprosessin seurantaan liittyviä tutkimuksia esimerkiksi rapsipelletistä.

Työssä saavutettujen tulosten perusteella voitiin todeta, että demonstroitu mittaustekniikka soveltuu käytettäväksi erilaisiin korkealämpötilamittauksiin muun muassa polttotekniikan tutkimussovelluksissa. Työssä käytetty CMOS-järjestelmäkamera soveltuu paikallaan pysyvien kohteiden korkealämpötilamittauksiin, kun taas CCD-suurnopeuskameralla voidaan mitata liikkuviakin kohteita. Suoritettujen mittaustekniikan kehitysmittausten pohjalta todettiin, että käytetyn värikameran ominaisuudet määräävät maksimi- ja minimilämpötilat, joita värikamerapyrometrialla pystytään mittaamaan. Mittausjärjestelyn määrääviä ominaisuuksia ovat kennon herkkyys, valotusajan säätöväli, kohinataso sekä käytettävän kameraobjektiivin valovoimaisuus. Pienin läm-

pötilä saavutetaan silloin, kun edes maksimivalotusajalla ei saada kerättyä riittävän suurta signaalia lämpötilan selvittämiseksi. Suurin mitattava lämpötila saavutetaan puolestaan silloin, kun mitattava kohde muuttuu niin kirkkaaksi, että mittauskuva ylivalottuu lyhyimmälläkin valotusajalla. Tärkeää värikamerapyrometrian mittauksissa onkin saada kohteesta tuleva signaali optimoitua sopivan kokoiseksi. Optimoinnissa voidaan käyttää apuna myös harmaasuotimia signaalin vaimentamiseksi.

Demonstroitua mittaustekniikkaa voidaan tarvittaessa kehittää eteenpäin. Tärkeimpänä kehityskohteenä on mittaustarkkuuden parantaminen. Työssä todettiin, että mittalaitteenä käytettävän värikameran kennon herkkyysvaste täytyy olla tarkasti tiedossa. Täytyy myös varmistaa esimerkiksi suotimia käyttämällä siitä, että mittaushetkellä tuleva signaali on peräisin ainoastaan halutulta aallonpituusalueelta. Tällöin mahdollista mittausvirhettä saadaan pienennettyä. Jatkotutkimuksissa voitaisiin pyrkiä mittaamaan käytetyn kamerakennon herkkyysvaste tarkasti, koska samanmallisten kennokappaleiden välilläkin voi olla eroja niiden herkkyysvasteissa.

Mittaustekniikan pohjana olevassa kaksiväripyrometriassa ongelmana joissain mittaussovelluksissa on mittaushetken optisten ominaisuuksien tunteminen. Erityisesti mitattavan kohteen emissiviteetti-erät eri aallonpituuksilla voivat olla epävarmoja. Tästä johtuen pikseliarvojen perusteella määritetyt lämpötilat saattavat joissakin olosuhteissa poiketa suurestikin todellisista mittaushetken lämpötiloista. Tämä tapahtuu erityisesti silloin kun mitataan ei-harmaan kappaleen, esimerkiksi läpinäkyvän liekin, lämpötilaa värikamerapyrometrian avulla. Väriarvokuvaukseen perustuvalla mittaustekniikalla voidaan kuitenkin havainnoida mittaushetken lämpötilojen ajallisia ja paikallisia muutoksia myös ei-harmailla kappaleilla.

Kaiken kaikkiaan työ osoitti, että digitaalista väriarvokuvausta voidaan hyödyntää optisissa korkealämpötilamittauksissa. Toteutetut mittalaitteet suunniteltiin polttotekniikan tutkimussovelluksien tarpeisiin. Kaksiväripyrometriaan perustuvaa kameramittaustekniikkaa voidaan jatkossa kehittää eteenpäin työssä luodulta teknologiapohjalta. Esimerkiksi työssä suunniteltua mittausprosessia, jossa mittalaitteenä käytettiin kaupallista järjestelmäkameraa, voitaisiin jatkossa kehittää siten, että se soveltuisi käytettäväksi myös erilaisiin teollisuuden korkealämpötilamittauksiin. Tällöin tavallista järjestelmäkameraa voitaisiin käyttää kalliiden teollisuuslämpökameroiden sijasta. Etuina kaupallisen järjestelmäkameran käyttämiselle korkeiden lämpötilojen mittalaitteenä ovat niiden edullisuus, kompaktius, helppokäyttöisyys sekä laaja saatavuus. Haittapuolena voidaan mainita niiden kestävyys vaativissa teollisuusolosuhteissa.

LÄHDELUETTELO

- [1] M. Planck, *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*. Annalen der Physik, Vol. 4, 1901, pp. 553–563.
- [2] R. Hernberg, *Optisen spektroskopian menetelmät*. Luentomoniste, Tampereen teknillinen yliopisto, 2004, 149 s.
- [3] D.V. Schroeder, *An Introduction to Thermal Physics*. Addison-Wesley Longman, San Francisco (CA), 2000, 422 p.
- [4] P.A. Tipler, R.A. Llewellyn, *Modern Physics*. 5th edition, W.H. Freeman & Co Ltd, New York, 2008, 680 p. Chapter 3-2.
- [5] M. Paananen, *Kaksiväripyrometrian soveltaminen eri happipitoisuuksissa poltettavien kivihiilihiukkasten lämpötilan ja koon mittaamiseen*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2008.
- [6] C.R. Nave, *Rayleigh-Jeans vs. Planck*. HyperPhysics, Georgia State University, Atlanta, verkkosivu, 2010. Saatavissa (viitattu 21.11.2014): <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod6.html#c4>
- [7] J. Nielson, *Story of Kodak: How They Could Have Saved The Business*. The Innovative Manager, verkkosivu, 2014. Saatavissa (viitattu 12.12.2014): <http://www.theinnovativemanager.com/story-of-kodak/>
- [8] Business Insider Inc., *About 880 Billion Photographs Will Be Taken In 2014 — Including A Lot Of Selfies*, verkkosivu, 2013. Saatavissa (viitattu 15.12.2014): <http://www.businessinsider.com/selfies-and-2013-2013-12?IR=T>
- [9] J. Nakamura, *Image sensors and signal processing for digital still cameras*. Taylor & Francis, Boca Raton (FL), 2006, 336 p.
- [10] P.B. Catrysse, B.A. Wandell, *Optical efficiency of image sensor pixels*. Journal of Optical Society of America A, 19(8), 2002, pp. 1610–1620. Saatavissa (viitattu 12.12.2014): http://web.stanford.edu/~pcatryss/documents/2002_JOSA-A_OE.pdf
- [11] B.E. Bayer, *Color Imaging Array*. U.S. Patent 3971065, July 20, 1976. Saatavissa (viitattu 12.12.2014): <http://www.google.com/patents/US3971065>
- [12] E. Allen, S. Triantaphillidou, *The Manual of Photography*. 10th edition, Taylor & Francis, Elsevier Ltd, 2011, 566 p.

- [13] H. Lu, L.-T. Ip, A. Mackrory, L. Werrett, J. Scott, D. Tree, L. Baxter, *Particle surface temperature measurements with multicolor band pyrometry*. AIChE Journal, 55(1), 2009, pp. 243–255. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.11677>
- [14] V. Bockaert, *Color Filter Array Sensor*. Digital Photography Review, Glossary, 2003. Saatavissa (viitattu 12.12.2014):
<http://www.dpreview.com/glossary/camera-system/color-filter-array>
- [15] R.N. Clark, *Digital Cameras: Does Pixel Size Matter?* ClarkVision.com, verkkosivu, February, 2005. Saatavissa (viitattu 15.12.2014):
<http://www.clarkvision.com/articles/does.pixel.size.matter>
- [16] *Photography -- Digital still cameras -- Determination of exposure index, ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index*. International Organization for Standardization, ISO 12232:2006, first published in August 1998, revised in April 2006, corrected in October 2006, 17p.
- [17] T.J. Fellers, K.M. Vogt, M.W. Davidson, *CCD Signal-To-Noise Ratio*. Nikon MicroscopyU, Java tutorial, verkkosivu, 2013. Saatavissa (viitattu 16.12.2014):
<http://www.microscopyu.com/tutorials/java/digitalimaging/signaltonoise/>
- [18] K.R. Spring, T.J. Fellers, M.W. Davidson, *Introduction to Charge-Coupled Devices (CCDs)*. Nikon MicroscopyU, Review Article, verkkosivu, 2013. Saatavissa (viitattu 16.12.2014):
<http://www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html>
- [19] Nobelprize.org, Nobel Media AB, *The Nobel Prize in Physics 2009*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 2.1.2015):
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/
- [20] B.G. Streetman, S.K. Banerjee, *Solid State Electronic Devices*. 6th edition, Person Prentice Hall, New Jersey, 2006, 581 p.
- [21] M.A. Green, M.J. Keevers, *Optical properties of intrinsic silicon at 300 K*. Prog. Photovolt: Res. Appl., 3, 1995, pp. 189–192.
<http://dx.doi.org/10.1002/pip.4670030303>
- [22] J. Vattulainen, *Advances in Optical Diagnostics of High Temperature Industrial Processes*. Väitöskirja, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1999.
- [23] T. Joutsenoja, *Pyrometric Thermometry and Sizing of Fuel Particles in Combustion*. Väitöskirja, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1998.
- [24] T. Laurila, *Fast Two-colour Pyrometer for Fuel Particle Thermometry in Pulverised Combustion*. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1998.

- [25] P. Mikkola, *Hiukkaspyrometrian sovellus pyrometallurgisen prosessin tutkimiseen*. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 2002.
- [26] T. Fu, Z. Yang, L. Wang, X. Cheng, M. Zhong, C. Shi, *Measurement performance of an optical CCD-based pyrometer system*. Optics & Laser Technology, 42(4), 2010, pp. 586–593. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.10.008>
- [27] H. Lu, *Experimental and modeling investigations of biomass particle combustion*. Dissertation, Brigham Young University, 2006, 192 p. Saatavissa: <http://scholarsarchive.byu.edu/etd/778>
- [28] Z. Xie, H. Bai, *Development of three-wavelength CCD image pyrometer used for the temperature field measurements of continuous casting billets*. Review of Scientific Instruments, 85(2), 2014, 024903. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4866679>
- [29] IMPERX Inc., *Bobcat cameras B1410*, verkkosivu, 2014. Saatavissa (viitattu 5.2.2015): <http://imperx.com/ccd-cameras/B1410/>
- [30] IMPERX Inc., *Bobcat CCD camera B1410 Specs sheet*, verkkosivu, 2014. Saatavissa (viitattu 5.2.2015): <http://bit.ly/1CiYITj>
- [31] Digchip.com, Sony Electronics Inc., *ICX285AQ CCD sensor datasheet 2005*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 12.2.2015): <http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/453/ICX285AQ.php>
- [32] JAI Inc., *JAI SDK and Control Tool*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 16.2.2015): http://www.jai.com/en/support/jai_sdk_and_control_tool
- [33] Nikon Europe B.V., *Nikon D5000 ominaisuudet*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 17.2.2015): http://www.nikon.fi/fi_FI/product/discontinued/digital-cameras/2012/d5000
- [34] Sensorgen.info, *Sensor data for Nikon D5000*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 17.2.2015): <http://www.sensorgen.info/NikonD5000.html>
- [35] DxO Labs. 2008–2015, *An in-depth case study of the use of DxOMark data, Canon 500D/T1i vs. Nikon D5000, Color blindness & sensor quality*, verkkosivu, 2009. Saatavissa (viitattu 19.2.2015): <http://www.dxomark.com/Reviews/Canon-500D-T1i-vs.-Nikon-D5000/Color-blindness-sensor-quality>
- [36] R. Cicala, *Sensor Size Matters – Part 2*. LensRentals.com Blog, verkkosivu, 2012. Saatavissa (viitattu 23.2.2015): <http://www.lensrentals.com/blog/2012/02/sensor-size-matters-part-2>

- [37] S. McHugh, *Lens Diffraction & Photography Tutorial*. Cambridge in Colour, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 23.2.2015): <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/diffraction-photography.htm>
- [38] CBC Group, CBC (AMERICA) Corp, *(TEC-M55) 2/3" 55mm Telecentric Lens (C Mount)*. Computar Products, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 23.2.2015): <http://computar.com/product/561/TEC-55>
- [39] Thorlabs Inc., *Mounted N-BK7 Reflective Neutral Density Filters*. Product Catalog, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 23.2.2015): http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=119
- [40] Nikon Europe B.V., *Nikkor -objektiivit, AF-S DX NIKKOR 35mm f/1.8G ominaisuuudet*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 24.2.2015): http://www.nikon.fi/fi_FI/product/nikkor-lenses/auto-focus-lenses/dx/single-focal-length/af-s-dx-nikkor-35mm-f-1-8g
- [41] Edmund Optics Inc., *UV/IR Cut-Off Filter - Mounted M52 x 0.75mm*, tuotetiedot, verkkosivu, 2014. Saatavissa (viitattu 24.2.2015): <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-filters/longpass-edge-filters/mounted-infrared-ir-filters/54750>
- [42] The MathWorks Inc., *Tips for reading a camera raw file into MATLAB*. MATLAB Central Blogs, Steve on Image Processing, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 26.2.2015): <http://blogs.mathworks.com/steve/2011/03/08/tips-for-reading-a-camera-raw-file-into-matlab/>
- [43] Adobe Systems Incorporated, *Photoshop Help / Digital Negative (DNG)*, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 26.2.2015): <http://helpx.adobe.com/photoshop/digital-negative.html>
- [44] H. Tolvanen, R. Raiko, *An experimental study and numerical modeling of combusting two coal chars in a drop-tube reactor: A comparison between N₂/O₂, CO₂/O₂, and N₂/CO₂/O₂ atmospheres*. Fuel, Volume 124, 15 May 2014, pp. 190–201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.103>
- [45] H. Tolvanen, *Modelling of coal combustion chemical kinetics under fluidized bed condition*. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2010.
- [46] IMPERX Inc., *Application note AN-B02, Bobcat camera series, triggering modes and options*, tekninen artikkeli, verkkosivu, May 2010, 12 p. Saatavissa (viitattu 16.3.2015): http://www.uniforcesales.com/wp-content/uploads/2013/11/AN_B02_TRG.pdf

- [47] Cavitar Ltd., *CAVILUX Smart, Pulsed diode laser light source*, tuotetiedot, verkkosivu, 2015. Saatavissa (viitattu 16.3.2015):
http://cavitar.com/solutions_and_services/illumination_lasers/products/cavilux_smart
- [48] H. Tolvanen, L. Kokko, R. Raiko, *Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling*. Fuel, Volume 111, September 2013, pp. 148–156.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.030>
- [49] M. Honkanen, P. Saarenrinne, T. Stoor, J. Niinimäki, *Recognition of highly overlapping ellipse-like bubble images*. Measurement Science and Technology, 16 (9), 2005, pp. 1760–1770. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/9/007>
- [50] J. Koornneef, M. Junginger, A. Faaij, *Development of fluidized bed combustion - An overview of trends, performance and cost*. Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, 2007, pp.19–55.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.001>
- [51] Z.-W. Jiang, Z.-X. Luo, H.-C. Zhou, *A simple measurement method of temperature and emissivity of coal-fired flames from visible radiation image and its application in a CFB boiler furnace*. Fuel, Volume 88, Issue 6, 2009, pp. 980–987.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.12.014>
- [52] C. Engelhard, A. Scheffer, T. Maue, G. M. Hieftje, W. Buscher, *Application of infrared thermography for online monitoring of wall temperatures in inductively coupled plasma torches with conventional and low-flow gas consumption*. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 62 (10), 2007, pp. 1161–1168.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2007.07.010>
- [53] C. McDaid, Y. Zhang, *Wall temperature measurements using a thermal imaging camera with temperature-dependent emissivity corrections*. Meas. Sci. Technol., 22 (12), 2011, 8 p. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/12/125503>

LIITTEET

LIITE A: LÄMPÖTILAJAKAUMAN LASKEMISEEN TARKOITETTU MATLAB-OHJELMISTO NIKON D5000 -JÄRJESTELMÄKAMERALLE

```

functi on
[kuvani mi , taustani mi , KA_RGB, GperR, l ampo_kuva]=l aske_l ampo_ni kon()

% Funktio muodostaa halutusta kuvasta (NEF-tiedostomuoto) lämpötilajakauman
% koko kuvan alalle. Funktio jakaa kuvan samankokoisiin halutun suuruisiin
% alueisiin ja laskee jokaiselle alueelle eri värikanavista keskiarvot.
% Jokaiselle kuvan alueelle lasketaan tämän jälkeen keskiarvojen suhde
% Green/Red. Tämä suhdeluku muunnetaan lopuksi vastaaviksi lämpötiloiksi
% (Celsius-asteina). Värikanavien suhdetta Green/Red vastaavat lämpötilat
% saadaan mustan kappaleen säteilijän sekä käytetyn kameran värikanavien
% spektrijakaumien perusteella. Esimerkki syöte:
% [kuvani mi , taustani mi , KA_RGB, GperR, l ampo_kuva]=l aske_l ampo_ni kon();

%% Pyydetään käyttäjää valitsemaan NEF-kuvatiedostot

[kuvani mi , path_name1]=ui getfi le(' *.NEF', 'Select a picture for analyzing');
kuvan_ni mi _cel l =textscan(kuvani mi , '%s %s', 'del i mi ter', '.');
kuvan_ni mi =char(kuvan_ni mi _cel l {1});

[taustani mi , path_name2]=ui getfi le(' *.NEF', 'Select a dark picture');
tausta_ni mi _cel l =textscan(taustani mi , '%s %s', 'del i mi ter', '.');
tausta_ni mi =char(tausta_ni mi _cel l {1});

%% Kysytään alueen koko, lämpötilatarkkuus ja DNG-tiedostojen poisto

userInput=input('Syötä alueen koko (parillinen kokonaisluku): ');

while mod(userInput,2)
    disp('Alueen koko on oltava parillinen kokonaisluku!')
    userInput=input('\nSyötä alueen koko uudelleen: ');
end

userInput2=input('Syötä lämpötilatarkkuus (Celsius-asteina): ');
userInput3=input('Poistetaanko luodut DNG-tiedostot? (y/n) [n]: ', 's');
if isempty(userInput3)
    userInput3='n';
end

fprintf('\nLasketaan lämpökuvaa, joka on jaettu %d x %d pikseliä kokoi si in
aluei si in,\ntarkkuudella %d Celsius-astetta. Odota hetki... \n', userIn-
put,userInput,userInput2)

%% Muunnetaan haetut NEF-tiedostot DNG-tiedostoiksi ja siirretään ne työhake-
mi stoon

if exist([kuvan_ni mi '.dng'], 'file')==0
    eval(['!DNG.exe -u -p1 -dng1.3 "' path_name1 kuvan_ni mi '.NEF"' ])
    source1=[path_name1,kuvan_ni mi '.dng'];
    destination1=[pwd '\', kuvan_ni mi '.dng'];
    movefi le(source1,destination1)
end
%% Ohjelma jatkuu seuraavalla sivulla →

```

```

if exist([tausta_nimi '.dng'],'file')==0
    eval(['!DNG.exe -u -p1 -dng1.3 "' path_name2 tausta_nimi '.NEF"''])
    source2=[path_name2, tausta_nimi '.dng'];
    destination2=[pwd '\', tausta_nimi '.dng'];
    movefile(source2,destination2)
end

%% Luetaan DNG-muodossa olevat mittauskuva ja pimeäkuva

warning off
warning off MATLAB: tifflib:TIFFReadDirectory:libraryWarning
t = Tiff([kuvan_nimi '.dng'],'r');
offsets = getTag(t,'SubIFD');
setSubDirectory(t,offsets(1));
cfa = read(t);
close(t);

warning off
warning off MATLAB: tifflib:TIFFReadDirectory:libraryWarning
t2 = Tiff([tausta_nimi '.dng'],'r');
offsets = getTag(t2,'SubIFD');
setSubDirectory(t2,offsets(1));
cfa2 = read(t2);
close(t2);

%% Suoritetaan kuvien lineaarisointi

info = imfinfo([kuvan_nimi '.dng']);
kanta=0:771;
curve = info.SubIFDs{1}.LinearizationTable;
uusi_kuva=zeros(size(cfa));

for jj=0:771
    a=cfa==jj;
    uusi_kuva(a)=curve(jj+1);
end

background=zeros(size(cfa2));

for hh=0:771
    b=cfa2==hh;
    background(b)=curve(hh+1);
end

%% Jaetaan kuvan alue 'sade'-pikseliä x 'sade'-pikseliä kokosiin osiin ja
%% suoritetaan taustavähennys (pimeäkuvan vähennys)

sade=userInput;
[M,N]=size(uusi_kuva);
XX=1:sade:N;
YY=1:sade:M;
kokoY=YY(length(YY))-1;
kokoX=XX(length(XX))-1;

uusi_kuva=uusi_kuva(1:kokoY,1:kokoX);
background=background(1:kokoY,1:kokoX);

konvo=conv2(ones(1,50)/50,ones(1,50)/50,background,'same');
taustapois=uusi_kuva-konvo; %% Ohjelma jatkuu seuraavalla sivulla →

```

```

[Q,R]=size(taustapois);
kuva_jaettu=ceil(Q/sade,R/sade);
kuva_jaettu=mat2cell(taustapois,sade*ones(1,(Q/sade)),sade*ones(1,(R/sade)));
kuva_jaettu{1,1}=taustapois(1:sade,1:sade);

%% Ladataan Bayer-matriisi kuvan jokaiselle osalle

load Bayer_nikon.mat

B_B_uusi=B_B(1:YY(length(YY))-1,1:XX(length(XX))-1);
B_R_uusi=B_R(1:YY(length(YY))-1,1:XX(length(XX))-1);
B_G_uusi=B_G(1:YY(length(YY))-1,1:XX(length(XX))-1);

B_Blue=mat2cell(B_B_uusi,sade*ones(1,(Q/sade)),sade*ones(1,(R/sade)));
B_Red=mat2cell(B_R_uusi,sade*ones(1,(Q/sade)),sade*ones(1,(R/sade)));
B_Green=mat2cell(B_G_uusi,sade*ones(1,(Q/sade)),sade*ones(1,(R/sade)));

B_Blue{1,1}=B_B_uusi(1:sade,1:sade);
B_Red{1,1}=B_R_uusi(1:sade,1:sade);
B_Green{1,1}=B_G_uusi(1:sade,1:sade);

%% Lasketaan värikanavien keskiarvot kuvan jokaiselle osalle

n_R=ceil(Q/sade,R/sade);
n_G=ceil(Q/sade,R/sade);
n_B=ceil(Q/sade,R/sade);

KA_Red=ceil(Q/sade,R/sade);
KA_Green=ceil(Q/sade,R/sade);
KA_Blue=ceil(Q/sade,R/sade);

for ii=1:length(YY)-1
    for kk=1:length(XX)-1
        n_R{ii,kk}=kuva_jaettu{ii,kk}.*B_Red{ii,kk};
        n_G{ii,kk}=kuva_jaettu{ii,kk}.*B_Green{ii,kk};
        n_B{ii,kk}=kuva_jaettu{ii,kk}.*B_Blue{ii,kk};

        KA_Red{ii,kk}=(sum(sum(n_R{ii,kk}))) / (sade^2/4);
        KA_Green{ii,kk}=(sum(sum(n_G{ii,kk}))) / (sade^2/4);
        KA_Blue{ii,kk}=(sum(sum(n_B{ii,kk}))) / (sade^2/4);
    end
end

KA_R=ceil(2*mat(KA_Red));
KA_G=ceil(2*mat(KA_Green));
KA_B=ceil(2*mat(KA_Blue));

KA_RGB=zeros(Q/sade,R/sade,3);
KA_RGB(:, :, 1)=KA_R;
KA_RGB(:, :, 2)=KA_G;
KA_RGB(:, :, 3)=KA_B;

GperR=zeros(Q/sade,R/sade);

%% Ohjelma jatkuu seuraavalla sivulla →

```

```

for nn=1:length(YY)-1
    for oo=1:length(XX)-1
        if KA_G(nn,oo)==max(curve) || KA_R(nn,oo)==max(curve)
            GperR(nn,oo)=10;
        elseif KA_G(nn,oo)*KA_R(nn,oo)<1000
            GperR(nn,oo)=0.01;
        elseif
            GperR(nn,oo)=KA_G(nn,oo). /KA_R(nn,oo);
        end
    end
end

%% Muunnetaan lasketut keskiarvojen suhteet (GperR) lämpötiloiksi [C]

T_diff=userInput2;
T_C=500:T_diff:2300;

% Luetaan funktiossa kanavien_suhde_nikon.m laskettu data!
load Nikon_G_R_suhde.mat

suhde=spline(T,G_R_suhde,T_C);
[S,T]=size(GperR);
lampo_kuva=zeros(size(GperR));

for ss=1:S*T
    [mini,paiikka]=min(abs(suhde-GperR(ss)));
    lampo_kuva(ss)=T_C(paiikka);

    if lampo_kuva(ss)==T_C(1)
        lampo_kuva(ss)=0;
    end
end

%% Jos käyttäjä haluaa, niin poistetaan lopuksi luodut DNG-tiedostot

if userInput3=='y'
    delete([kuvan_nimi '.dng'], [tausta_nimi '.dng'])
elseif userInput3=='n'
    return
elseif
    userInput3=input('Poistetaanko luodut DNG-tiedostot? (y/n) [n]: ','s');
    if isempty(userInput3)
        userInput3='n';
    end
    if userInput3=='y'
        delete([kuvan_nimi '.dng'], [tausta_nimi '.dng'])
    elseif userInput3=='n'
        return
    end
end
end

```

Ohjelma 9. MATLAB-funktio *laske_lampo_nikon.m*: Funktio laskee Nikon D5000 -järjestelmäkameralla otetusta NEF-mittauskuvasta mittauskohteen lämpötilajakauman koko kuvan alalle. Mittausjärjestelylle ominainen lämpötilariippuvuus on tallennettuna tiedostoon ”Nikon_G_R_suhde.mat”. Ennen mittauskuvan ottamista täytyy ottaa mittauskuvan kanssa samoilla mittausparametreilla otettu pimeäkuva (linssinsuojus objektivin edessä).

LIITE B: SPEKTRIVASTEDATA CCD-KENNOLLE SONY ICX285AQ

Tämän työn yhtenä mittalaitteena käytettiin *IMPERX Bobcat IGV-B1410C* CCD-värikameraa. Kameran käyttämän *Sony ICX285AQ* -kuvakennon värikanavien spektrivastedata esitetään tässä liitteessä taulukkomuodossa (350 – 1100 nm). Spektrivasteditaulukko on lainattu lähteestä [27]. Taulukossa aallonpituudet on ilmoitettu mikrometreissä. Työn mittauksissa hyödynnettiin tätä lähteen [27] väitöstyössä mitattua ICX285AQ-kennon spektrivastedataa (kuva 4.3).

Spectral responsivity data of the CCD camera

Red channel		Green channel		Blue channel	
Wavelength	Response	Wavelength	Response	Wavelength	Response
0.35	0	0.35	0	0.35	0
0.353	0	0.353	0.00181	0.353	0.0065
0.369	0	0.368	0.013	0.37	0.068
0.386	0	0.386	0.024	0.386	0.149
0.394	0	0.394	0.026	0.392	0.0196
0.405	0	0.404	0.032	0.403	0.24
0.412	0.00157	0.412	0.036	0.411	0.304
0.419	0.00214	0.419	0.04	0.42	0.374
0.438	0.00488	0.438	0.054	0.429	0.455
0.449	0.00723	0.449	0.067	0.444	0.563
0.459	0.00895	0.458	0.076	0.453	0.68
0.468	0.00952	0.468	0.099	0.467	0.724
0.476	0.00952	0.476	0.143	0.479	0.701
0.484	0.01	0.484	0.229	0.49	0.563
0.492	0.013	0.492	0.36	0.495	0.482
0.502	0.016	0.502	0.539	0.502	0.325
0.516	0.024	0.513	0.721	0.516	0.199
0.529	0.029	0.524	0.845	0.529	0.116
0.54	0.026	0.54	0.906	0.54	0.057
0.55	0.023	0.553	0.859	0.55	0.035
0.56	0.032	0.563	0.785	0.56	0.016

0.57	0.136	0.57	0.683	0.57	0.016
0.58	0.572	0.58	0.569	0.58	0.012
0.59	0.919	0.59	0.419	0.59	0.00679
0.6	1	0.6	0.248	0.6	0.00588
0.61	0.997	0.61	0.12	0.61	0.00197
0.62	0.96	0.62	0.065	0.62	6.83E-04
0.63	0.941	0.63	0.045	0.63	9.16E-04
0.64	0.908	0.64	0.036	0.64	7.58E-04
0.65	0.88	0.65	0.03	0.65	8.44E-04
0.66	0.831	0.66	0.031	0.66	0.00202
0.67	0.784	0.67	0.039	0.67	0.00219
0.68	0.734	0.68	0.058	0.68	0.00284
0.69	0.705	0.69	0.086	0.69	0.00387
0.699	0.658	0.7	0.114	0.7	0.00464
0.71	0.623	0.71	0.126	0.71	0.00375
0.72	0.595	0.72	0.12	0.72	0.00276
0.73	0.55	0.73	0.113	0.73	0.00234
0.74	0.52	0.74	0.125	0.74	0.00345
0.75	0.471	0.75	0.144	0.75	0.00399
0.76	0.439	0.76	0.156	0.76	0.00396
0.77	0.397	0.77	0.164	0.77	0.00469
0.78	0.352	0.78	0.177	0.78	0.011
0.79	0.323	0.79	0.189	0.79	0.046
0.8	0.3	0.8	0.2	0.8	0.123
0.81	0.271	0.81	0.205	0.81	0.178
0.82	0.238	0.82	0.199	0.82	0.189
0.83	0.219	0.829	0.193	0.83	0.19
0.84	0.207	0.84	0.188	0.84	0.185
0.85	0.193	0.849	0.182	0.85	0.178
0.86	0.183	0.859	0.175	0.859	0.172
0.87	0.172	0.87	0.165	0.87	0.162

0.88	0.16	0.88	0.155	0.88	0.152
0.89	0.147	0.89	0.143	0.89	0.141
0.9	0.135	0.9	0.131	0.9	0.13
0.911	0.126	0.91	0.123	0.91	0.121
0.92	0.117	0.92	0.114	0.92	0.113
0.93	0.104	0.93	0.102	0.93	0.101
0.94	0.093	0.94	0.091	0.94	0.09
0.95	0.084	0.95	0.082	0.95	0.08
0.96	0.071	0.96	0.07	0.96	0.069
0.97	0.061	0.97	0.06	0.97	0.059
0.98	0.051	0.98	0.05	0.98	0.049
0.99	0.043	0.99	0.041	0.99	0.041
1	0.035	1	0.034	1	0.034
1.01	0.029	1.01	0.029	1.01	0.028
1.02	0.023	1.02	0.023	1.02	0.022
1.03	0.018	1.03	0.017	1.03	0.017
1.04	0.014	1.04	0.013	1.04	0.013
1.05	0.01	1.049	0.01	1.05	0.00991
1.06	0.0079	1.06	0.0077	1.06	0.00774
1.07	0.00596	1.07	0.00577	1.07	0.00566
1.08	0.00471	1.08	0.00451	1.08	0.00441
1.09	0.00368	1.09	0.0036	1.09	0.00358
1.1	0.0028	1.1	0.0025	1.1	0.0022
1.11	0.00221	1.11	0.002	1.11	0.0018
1.13	0.00123	1.13	0.0012	1.13	0.00115
1.15	0	1.15	0	1.15	0

LIITE C: SPEKTRIVASTEDATA NIKON D5000 -JÄRJESTELMÄKAMERAN CMOS-KENNOLLE

Tämän työn toisena mittalaitteena käytettiin Nikon D5000 -järjestelmäkameraa. Kameran CMOS-kuvakennon värikanavien spektrivastedata (400 – 700 nm) esitetään tässä liitteessä taulukkomuodossa. Spektrivastedata on poimittu lähteestä [35]. Työn mittauksissa hyödynnettiin tässä lähteessä [35] mitattua RGB-signaalivastetta (kuva 4.7). Spektrivastedatataulukossa aallonpituudet on ilmoitettu nanometreissä. Taulukossa jokaisen värikanavan vasteen maksimiarvo on lihavoitu.

Aallonpituus [nm]	Punaisen kanavan suhteellinen vaste	Vihreän kanavan suhteellinen vaste	Sinisen kanavan suhteellinen vaste
405	0	0	0,0025
410	0	0	0,01192150
415	0,01320391	0,01162093	0,11477637
420	0,03430119	0,02944198	0,26781011
425	0,05254302	0,05002907	0,46121834
430	0,06011302	0,06937516	0,66849071
435	0,05451832	0,08611821	0,77747902
440	0,04791539	0,10150198	0,82347706
445	0,04594854	0,11534892	0,86229246
450	0,04348871	0,12946117	0,89733775
455	0,04026152	0,15601786	0,91715117
460	0,04141143	0,17670832	0,92907520
465	0,04485289	0,24893455	0,94830999
469	0,04518737	0,32448269	0,96297197
470	0,04503972	0,33776423	0,96228544
475	0,04454796	0,36918970	0,92265848
480	0,04460519	0,38343096	0,85066783
485	0,04520330	0,41281269	0,77580365
490	0,04580550	0,45736984	0,70893504
495	0,04487292	0,51227842	0,63249336
500	0,04286311	0,56219935	0,55040674
505	0,04730190	0,64941092	0,47463503
510	0,06293847	0,76717169	0,38634438
515	0,07868534	0,85805388	0,29222516
520	0,09044978	0,94842656	0,20965880
525	0,09576437	0,97475358	0,15431801
530	0,09199181	1	0,12189445
535	0,07782280	0,98640288	0,10001924
540	0,05668304	0,97002181	0,08161003

Aallonpituus [nm]	Punaisen kanavan suhteellinen vaste	Vihreän kanavan suhteellinen vaste	Sinisen kanavan suhteellinen vaste
545	0,04093260	0,92216887	0,06494014
550	0,03337299	0,87896037	0,04861325
555	0,03089012	0,83463169	0,03294761
560	0,04212697	0,78831245	0,01975781
565	0,08543299	0,66479024	0,01089867
570	0,19126042	0,52913391	0,00687167
575	0,36565853	0,46841872	0,00547109
577	0,44575172	0,45083169	0,00507998
580	0,54569801	0,41369619	0,00425257
585	0,64756372	0,34548258	0,00237841
590	0,73483736	0,27705663	0,00045883
593	0,74795113	0,23061694	0
595	0,73954522	0,19866767	0
598	0,71253757	0,15458736	0
600	0,69148346	0,13078048	0
605	0,64144898	0,09213276	0
610	0,59420144	0,07254905	0
615	0,56591904	0,05868479	0
620	0,51990523	0,04424131	0
625	0,43966432	0,03118201	0,00015187
630	0,38287683	0,02190084	0,00048908
635	0,34653512	0,01712774	0,00066781
640	0,31244823	0,01537486	0,00070128
645	0,27141539	0,01500032	0,00060277
650	0,22654309	0,01453490	0,00038550
655	0,19403665	0,01358655	0
660	0,16780374	0,01217782	0
665	0,12651834	0,01033215	0
670	0,08968881	0,00811839	0
675	0,05797259	0,00591117	0
680	0,03123790	0,00419669	0
685	0,01582883	0,00314404	0
690	0,01259759	0,00261472	0
695	0,01127787	0,00245761	0
700	0,00361414	0,00249837	0